

# 画像処理を用いた彫刻刀姿勢の計測法に関する研究

徳永 修一\* 西川 将太\*\*

## A Study on Measurement Method of Graver Posture Using Image Processing

Shuichi TOKUNAGA and Shouta NISHIKAWA

### Abstract

In this paper, we propose the method of measuring the posture of the graver under sculpture work for virtual sculpture system using image processing. The target of this research is development of the virtual sculpture system which supports the expert's skill succession which used the virtual reality as an example about the sculpture of traditional handicrafts. The proposal method is as follows. First, the area of four markers attached to the graver is recognized using image processing technology. Next, it is calculated for inclination of a marker and the position of the depth direction of a picture from the area of a marker. And it is calculated for the position of a graver from inclination and the position of a marker. Finally, we build virtual workspace. We display a measurement result of the position of the graver on virtual workspace continuously.

*Key Words:* Sculpture Work, Skill Succession, Image Processing, Virtual Workspace

### 1. 緒言

日本の伝統的工芸品産業はシェアの低下により仕事量が減少している。また、後継者不足などの問題も抱えており、実際に企業数や従事者数は図1に示すように年々減少している状況である。製造業ではマニュアル化しづらい職人的作業のような現場固有の技能が数多く存在するが、中でも伝統工芸は多くの経験と長期間の修行によって初めて体得でき、短期間では身につかないことから、いかにしてその技能を後世に伝えていくかが大きな課題となっている。そのため、伝統工芸品の製作過程のデジタル化により伝統工芸を保存し、技能伝承を目指す後継者への支援環境の整備が重要なテーマであると考えられる。

本研究の目標は、熟練者の道具の使い方の教示や練習を行う画像処理を用いた技能の伝承を支援するシステムとして、彫刻作業における仮想彫刻システムを開

発することである。本稿では、本システムのために彫刻作業中の彫刻刀の姿勢（刃先位置と中心軸の傾き）の測定方法を提案し、得られた結果より仮想作業空間上に彫刻刀を表示する方法について報告する。

### 2. 仮想彫刻システムについて

彫刻作業において彫刻刀の使い方は見聞きしただけでは理解や習得が難しい。そのため、熟練者が経験によって得た彫刻刀の動かし方を再現できるだけでなく

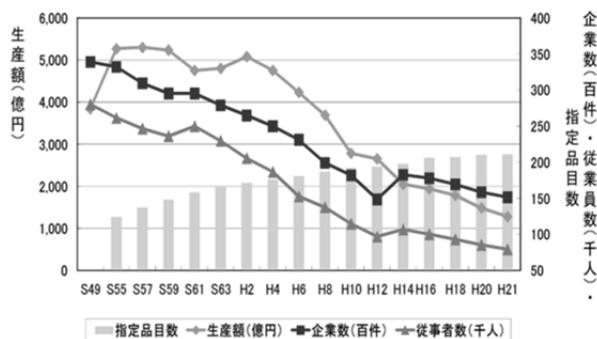


図1 伝統的工芸品産業の生産額等の推移

\* 香川高等専門学校詫間キャンパス 情報工学科

\*\* 三菱電機エンジニアリング

彫刻刀の把持力や彫刻刀を介して受ける感覚（力覚）の提示や熟練者の技術を参照する機能を持った、図2に示す仮想彫刻システムを考える。本システムは、彫刻刀の位置、把持力、頭部の位置を測定する「測定部」、仮想の作業環境を表示する「表示部」、彫刻作業で受ける力覚を提示する「力覚部」、彫刻刀の動かし方の再現や把持力に関する技能データベースを用いた「支援部」の4つの部分から構成する。本システムには次に示す①から⑦の機能を用意する必要があると考える。

- ①彫刻刀の姿勢の測定機能
- ②彫刻刀にかかる力の測定機能<sup>2)</sup>
- ③彫刻刀使用感覚の提示機能
- ④材料測定表示機能<sup>3)</sup>
- ⑤頭部の位置測定機能
- ⑥仮想作業空間の表示機能
- ⑦彫刻作業の支援機能（データベース）

本研究では「①彫刻刀の姿勢の測定機能」、「⑥仮想作業空間の表示機能」を実現するため、画像処理のパターン認識を用いて彫刻刀の姿勢を測定する方法<sup>4)</sup>と測定結果より仮想の彫刻刀を仮想作業空間へ表示する方法を提案する。

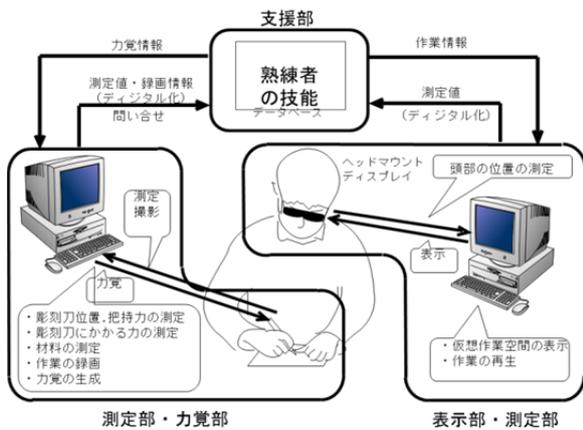
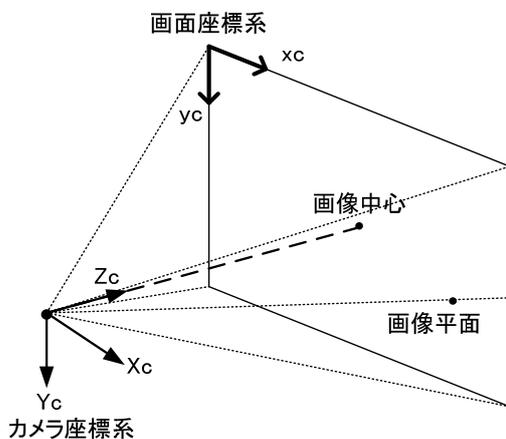


図2 仮想彫刻システム



### 3. 測定手法

#### 3.1. 彫刻刀の姿勢の計算方法

彫刻作業時の彫刻刀の姿勢として、彫刻刀の刃先位置と中心軸の傾きを用いる。図3に示す彫刻刀の位置に図4に示す4種類のマーカ1から4を取り付け、ARToolKit<sup>5)</sup>を用いてマーカの位置を測定する。カメラ座標系 $(X_c, Y_c, Z_c, 1)^T$ とマーカ座標系 $(X_m, Y_m, Z_m, 1)^T$ を図5に示すように設定する。カメラ座標の位置座標はマーカ座標系の位置座標から式(1)で求められる。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{21} & r_{31} & t_x \\ r_{12} & r_{22} & r_{32} & t_y \\ r_{13} & r_{23} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

彫刻刀に縦に並べて取り付けた2つのマーカ1, 2の中心位置の座標とマーカ平面の単位法線ベクトルを

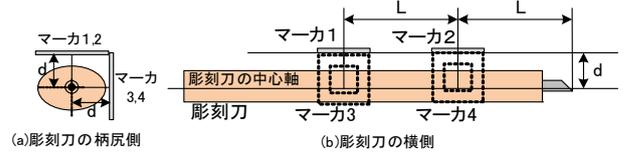


図3 マーカの取り付け位置

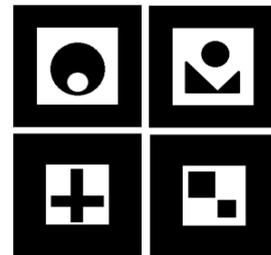


図4 マーカ (右上:1, 右下:2, 左上:3, 左下:4)

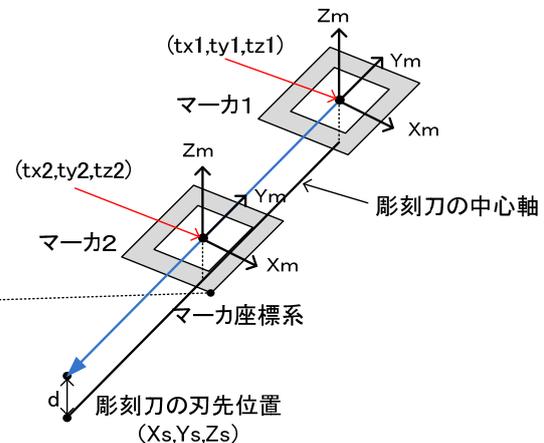


図5 座標系の定義

ARToolKit を用いてそれぞれ求め、彫刻刀の刃先位置の3次元座標はマーカ間のベクトルから式(2)で求められる。

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = L_1 L_2 \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} = \frac{2L}{\sqrt{(t_{x2}-t_{x1})^2 + (t_{y2}-t_{y1})^2 + (t_{z2}-t_{z1})^2}} \left\{ \left( \begin{bmatrix} t_{x2} \\ t_{y2} \\ t_{z2} \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} Z_{nx2} \\ -Z_{ny2} \\ -Z_{nz2} \end{bmatrix} \right) - \left( \begin{bmatrix} t_{x1} \\ t_{y1} \\ t_{z1} \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} Z_{nx1} \\ -Z_{ny1} \\ -Z_{nz1} \end{bmatrix} \right) \right\} \quad (2)$$

ここで、彫刻刀の刃先位置座標を $(X_s, Y_s, Z_s)^T$ 、マーカ1の中心座標を $(t_{x1}, t_{y1}, t_{z1})^T$ 、マーカ2の中心座標を $(t_{x2}, t_{y2}, t_{z2})^T$ 、マーカ1, 2の中心位置座標と彫刻刀の中心軸との距離を $d$ 、マーカ1のマーカ平面の単位法線ベクトルを $(Z_{nx1}, Z_{ny1}, Z_{nz1})^T$ 、マーカ2のマーカ平面の単位法線ベクトルを $(Z_{nx2}, Z_{ny2}, Z_{nz2})^T$ とする。ベクトル $(Z_{nx}, -Z_{ny}, -Z_{nz})^T$ はマーカ平面の単位法線ベクトル $(Z_{nx}, Z_{ny}, Z_{nz})^T$ をX軸周りに $180^\circ$ 回転させたベクトルである。そして、マーカ1, 2の中心位置座標間の距離 $l_1$ とマーカ2の中心位置座標と刃先との距離 $l_2$ を同じ距離 $L$ にしていることから、式(2)は式(3)の形で与えられる。

$$\begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = 2 \left( \begin{bmatrix} t_{x2} \\ t_{y2} \\ t_{z2} \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} Z_{nx2} \\ -Z_{ny2} \\ -Z_{nz2} \end{bmatrix} \right) - \left( \begin{bmatrix} t_{x1} \\ t_{y1} \\ t_{z1} \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} Z_{nx1} \\ -Z_{ny1} \\ -Z_{nz1} \end{bmatrix} \right) \quad (3)$$

マーカ3, 4の中心位置座標と彫刻刀の中心軸との距離も $d$ とすると、マーカ3, 4の中心位置座標とマーカ平面の単位法線ベクトルから刃先位置の三次元座標をマーカ1, 2の場合と同様に求められる。

彫刻刀の中心軸の傾きはマーカ座標系のX軸, Y軸の傾きとし、作業平面(XY平面)とマーカ1の中心座標からマーカ2の中心座標へのベクトル $(t_{x2} - t_{x1}, t_{y2} - t_{y1}, t_{z2} - t_{z1})$ とがなす角度として求められる。

### 3.2. 仮想作業空間への表示

仮想作業空間の大きさを図6に示す。1辺409.6mmの立方体の三次元座標(X, Y, Z)とする空間として設定し、実空間における長さ409.6mmを4096ドットで表示可能な仮想の作業空間を構築する。彫刻刀の姿勢の測定値より仮想の彫刻刀を仮想作業空間上に、OpenGL<sup>®</sup>とC++言語プログラム環境としてMicrosoft Visual C++ 2010を用いて作成したプログラムにより表示する。仮想作業空間を任意の方向から表示することで、彫刻刀の動きを任意の方向から見る事ができる。

### 4. 実験方法

彫刻刀の扱い方は、図7の基本的な図形(直線, 曲線)の線に沿って彫ることで彫刻作業の練習を行う。熟練者が練習のために描いた直線・曲線の長さから基本の直線の長さを50mm, 基本の曲線は1周期の長さが50mm, 振幅が30mmのsin波形とする。熟練者と初心者が基本図形を彫っているときの彫刻刀の刃先位置と中心軸の傾きを測定する。彫刻作業は図8に示すように、下絵に沿って行い、断面が三角形になるように、最初材料に描かれた線の下側を彫り、次に材料を回転して線の上側を彫る。図9に示すように実験には2台のカメラを用いる。それぞれのカメラの入力画像を図10に示す。カメラ1は作業平面に垂直な方向から、カメラ2は作業平面に水平な方向から彫刻刀の画像をパソコン

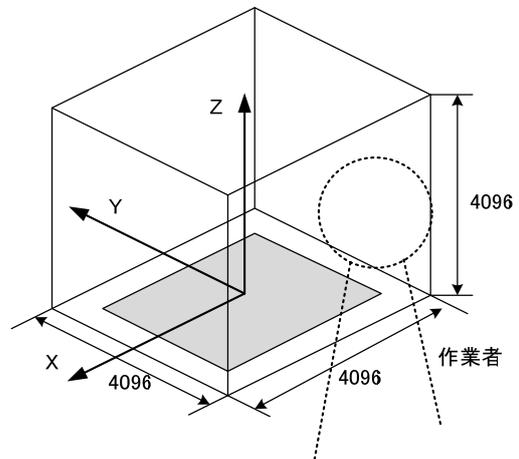


図6 仮想作業空間の大きさ

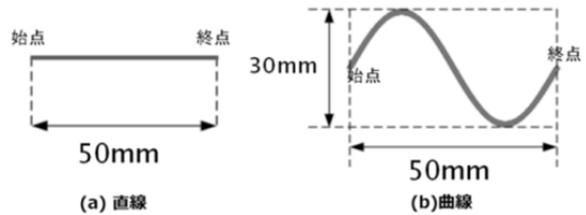


図7 基本図形

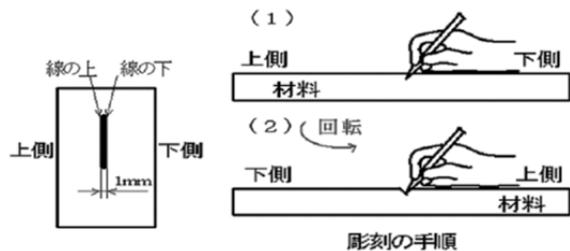


図8 彫刻作業手順

ンに取り込む。入力する画像サイズは縦1280画素、横720画素で、画像の入力は1秒間に30フレームである。マーカの中心位置座標 (X, Y, Z座標) の測定値は、カメラ1の画像より作業平面座標 (X, Y座標) を求め、カメラ2の画像より高さ (Z座標) を求める。使用したマーカのサイズは縦30mm、横30mm、マーカの中心位置座標と彫刻刀の中心軸との距離は $d=28\text{mm}$ である。

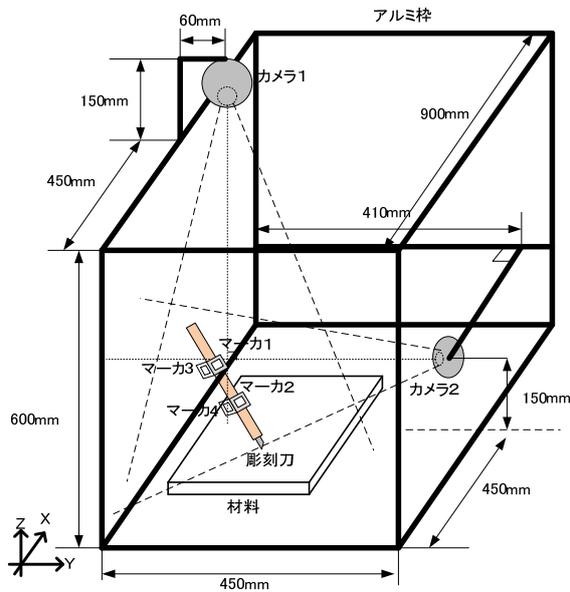
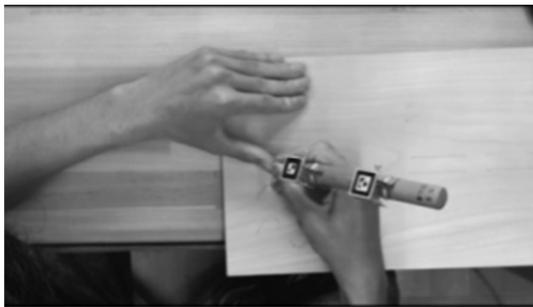


図9 実験装置の構成



(a) カメラ1(上)



(b) カメラ2(正面)

図10 入力画像

## 5. 実験結果

### 5.1. 彫刻刀の姿勢の測定結果

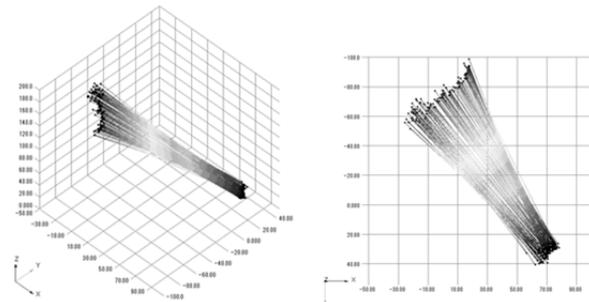
#### (1) 直線の場合

カメラ1とカメラ2の入力画像より彫刻刀の刃先と中心軸の三次元座標を1/30秒間隔で測定値が得られた。基本図形の直線を彫刻した場合について、基本図形の始点から終点までの一回分の彫刻作業について熟練者(讃岐彫の彫刻師)と初心者(本校学生)の彫刻刀の姿勢を表す刃先位置と中心軸の傾きの測定結果をそれぞれ図11, 12に示した。図の線分は、計算により求めた刃先位置からの彫刻刀の中心軸で、この線分の傾きにより中心軸の傾きを示した。

XY平面図は彫刻作業を真上(Z軸方向)から見下ろした図である。これより、彫刻刀をゆっくり動かした場合は測定点の間隔が狭く、早く動かした場合は測定点の間隔が広いことから刃先の動きを確認することができた。また、中心軸の傾きより、熟練者は初心者に比べて彫刻刀を扱う時に手首のひねりをくわえるような動きが見られた。それに対し、初心者は直線の真ん中付近でやや平行移動しながら、ゆっくりと彫っていることがわかった。

#### (2) 曲線の場合の測定結果

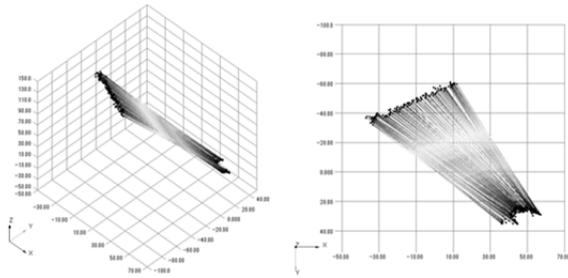
基本図形の曲線を彫刻した場合について、熟練者と初心者の彫刻刀の刃先位置と中心軸の傾きの測定結果をそれぞれ図13, 14に示した。曲線の場合は、直線に比べて何回にも分けて彫刻していた。そのため、曲線の始点から終点までの測定結果を一つの図で示すと観察しにくいので、曲線の特徴的な部分(カーブの部分)のみを抽出した場合を示した。熟練者と初心者のXY平面図の中心軸の傾きから、熟練者は彫刻刀の柄尻が回転するように彫っていたが、初心者は彫刻刀を持っている部分を中心に彫刻刀をひねるような動きで曲線部分を彫っていたことがわかった。



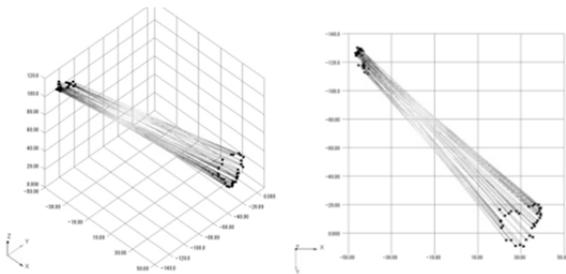
(a) 三次元座標

(b) XY平面

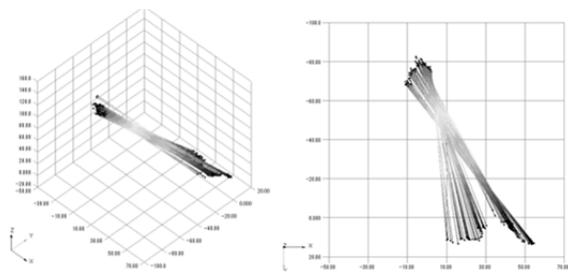
図11 熟練者(直線)



(a) 三次元座標 (b) XY平面  
図12 初心者(直線)



(a) 三次元座標 (b) XY平面  
図13 熟練者(曲線)



(a) 三次元座標 (b) XY平面  
図14 初心者(曲線)

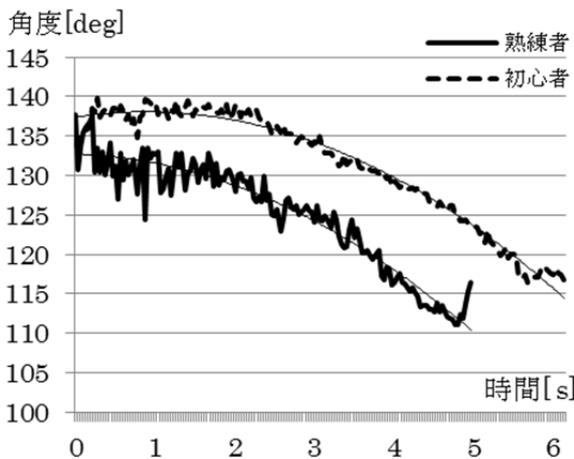


図15 XY平面上でのX軸とのなす角度の変化

(3)直線の場合の中心軸の傾きの計算結果

熟練者と初心者の彫刻刀の中心軸の傾きについて、彫刻作業を真上 (Z軸方向) から見た場合の彫刻刀の中心軸の傾き (X軸との角度) の計算結果を図15、表1に示した。熟練者の彫り始めの角度は137.7°、彫り終わりの角度は116.5°であった。彫刻刀の傾きは最大値137.7°から最小値111.1°であり、彫刻刀は26.6°回転していた。初心者の彫り始めの角度は133.7°、彫り終わりの角度は116.5°であった。彫刻刀の傾きは最大値139.9°から最小値116.5°であり、彫刻刀は23.4°回転していた。この回転角度の変化量は熟練者も初心者も時計回りにはほぼ同じ角度回転していることがわかった。

彫刻作業をX軸方向から見た場合の彫刻刀の中心軸の傾き (Y軸との角度) の計算結果を図16、表1に示した。熟練者の彫り始めの角度は61.8°、彫り終わりの角度は50.7°であった。彫刻刀の傾きは、最大値64.7°から最小値50.7°であり、傾きの差は14.0°であった。初心者の彫り始めの角度は60.7°、彫り終わりの角度は56.7°であった。彫刻刀の傾きは最大値66.3°から最小値56.6°であり、傾きの差は9.7°であった。熟練者は初心者に比べて彫り終わりの傾きが4°ほど小さかった。

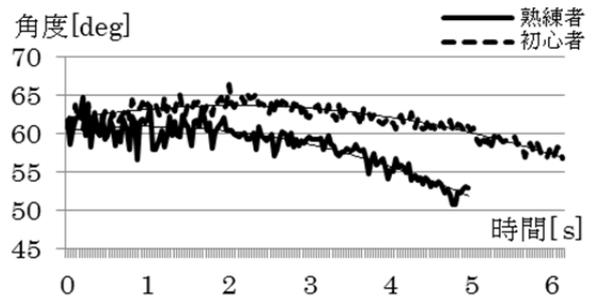


図16 YZ平面上でのY軸とのなす角度の変化

表1 直線の場合の彫刻刀の傾き

被験者		熟練者	初心者
X軸	彫り始めの角度	137.7°	133.7°
	彫り終わりの角度	116.5°	116.5°
	回転角度	26.6°	23.4°
Y軸	彫り始めの角度	61.8°	60.7°
	彫り終わりの角度	50.7°	56.7°
	回転角度	14.0°	9.7°

また、それぞれの角度変化は近似曲線より、熟練者は彫り始めから徐々に減少していたが、初心者はやや山なりに減少していた。これより、熟練者が彫刻刀を徐々にねかせるように動かし、初心者は彫刻刀を少し立て、その後徐々にねかせるように動かしていた。

彫刻作業に要した時間は熟練者が5.1秒、初心者が6.3秒であった。熟練者と初心者の直線50mmの彫刻作業より、彫刻刀を動かす速度は、熟練者が平均 8.65 mm/s、初心者が平均 7.05 mm/sであった。

(4) 曲線の場合の中心軸の傾きの計算結果

熟練者と初心者の彫刻刀の中心軸の傾きについて、彫刻作業を真上（Z軸方向）から見た場合の彫刻刀の中心軸の傾き（X座標との角度）の計算結果を図17、表2に示した。熟練者の彫り始めの角度は118.0°、彫り終わりの角度は122.8°であった。彫刻刀の傾きは最大値128.3°から最小値117.7°であり、彫刻刀は10.6°回転していた。初心者の彫り始めの角度は128.6°、彫り終わりの角度は96.5°であった。彫刻刀の傾きは最大値128.6°から最小値95.2°であり、彫刻刀は33.4°回転していた。熟練者は彫刻刀の柄尻を回転させるように動かし、初心者は彫刻刀を持っているところを中心に彫刻刀をひねるように動かして曲線部分を彫っていたためと考えられる。

作業台をX軸方向から見た場合の彫刻刀の中心軸の傾き（Y軸との角度）の計算結果を図18、表2に示した。熟練者の彫り始めの角度は41.1°、彫り終わりの角度は34.5°であった。彫刻刀の傾きは最大値45.0°から最小値34.5°であり、傾きの差は10.5°であった。初心者の彫り始めの角度は58.9°、彫り終わりの角度は57.6°であった。彫刻刀の傾きは最大値64.3°から最小値57.6°であり、傾きの差は6.7°であった。それぞれの角度変化は近似曲線より、初心者は彫り始めから彫り終わりまで彫刻刀の傾きを約60°であまり変化していないが、熟練者は徐々に角度が減少していた。また、熟練者と初心者の彫り始めの角度の差より、熟練者は初心者に比べて彫刻刀を17.8°傾けていた。

熟練者と初心者の曲線の始点から終点までの1回の彫刻作業の中で材料を回転している部分の時間を除いた時の彫刻刀を動かす速度は、熟練者は平均 5.7 mm/s、初心者は平均 2.5 mm/sであった。図17、18より、熟練者の速度は初心者の約3.5倍速く、曲線の彫刻作業は熟練度の差が現れると考えられる。

本報告で測定した熟練者は1人であるため、多くの熟練者が今回の測定結果に当てはまるとはいえない。また、直線と曲線の両方の場合に言えることは熟練者

の彫刻速度が速いため、マーカの測定不良が発生した。ゆっくり彫刻している初心者の測定値は安定して測定できた。これより、素早い動きを伴



図17 XY平面上でのX軸とのなす角度の変化

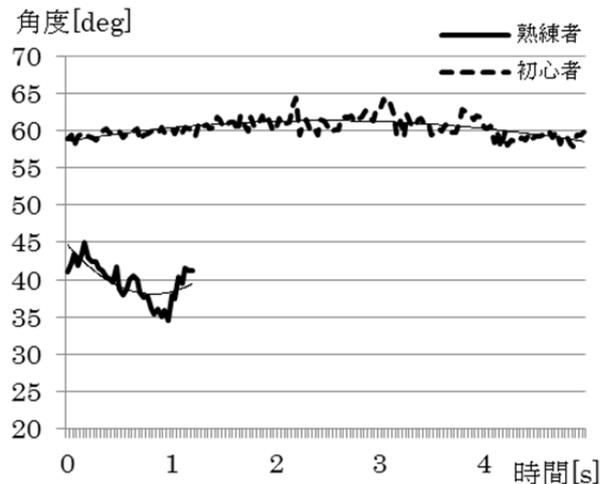


図18 YZ平面上でのY軸とのなす角度の変化

表2 曲線の場合の彫刻刀の傾き

被験者		熟練者	初心者
X軸	彫り始めの角度	118.0°	128.6°
	彫り終わりの角度	122.8°	96.5°
	回転角度	10.6°	33.4°
Y軸	彫り始めの角度	41.1°	58.9°
	彫り終わりの角度	34.5°	57.6°
	回転角度	10.5°	6.7°

う彫刻作業では、カメラの画像入力が30fpsでは十分であるとは言えない。

## 5.2. 仮想空間作業空間への表示例

直線と曲線を彫刻した場合の彫刻刀の刃先位置と中心軸の傾きの測定結果より、図19に示すように仮想彫刻作業を任意の方向から確認することができると思われる。しかし、素早い動きをする熟練者の場合、マーカの測定不良が発生したためスムーズな動きで表示できない場合があった。



図19 仮想作業空間上への仮想彫刻刀の表示例

## 6. 結言

彫刻刀の姿勢を測定するために実験装置を試作し、提案した画像処理を用いた測定方法により、熟練者と初心者の基本図形の彫刻作業をしている場合について刃先位置と中心軸の傾きを測定することができた。測定結果を用いて熟練者と初心者の彫り方についての検討を行った結果、熟練者と初心者の彫刻刀の扱い方の違いとして直線の場合では熟練者は初心者に比べて彫刻刀を扱う時に手首のひねりをくわえるような動きが見られた。曲線の場合では、熟練者は彫刻刀の柄尻が回転するように彫っていることがわかった。しかし、被験者数が少ないので、多くの熟練者がこれに当てはまるとはいえない。また、得られた彫刻刀の刃先位置と中心軸の傾きの測定結果より、設定した仮想作業空間内に作業中の彫刻刀の姿勢を仮想の彫刻刀を用いて任意の方向から表示することができた。

今後の課題は、高解像度の画像入力と単位時間当たりの画像入力割合が高いカメラを用いてマーカの測定不良をなく精度良くマーカが測定できるシステムを開発することである。また、熟練者の彫刻刀の動かし方を、彫刻材料の回転の測定と合わせて考慮し、彫刻刀と材料の動きを同時に分析することである。

## 参考文献

- 1) 産業構造審議会伝統的工芸品産業分科会(第6回)-配付資料 資料6伝統的工芸品産業をめぐる現状と今後の振興施策について, 2011
- 2) 大西祐生, 徳永修一, 坂田昌平, 工具の力分布の測定法に関する研究, 電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp.78, 2009
- 3) 中谷彰吾, 徳永修一, 仮想彫刻システムのための材料位置の計測に関する研究, 電気関係学会四国支部連合大会講演論文集, pp.75, 2008
- 4) Shuichi Tokunaga, Shouta Nishikawa and Hirokazu Osaki, A Study on Measurement of the Graver Position for Virtual Sculpture Training System, Proceedings of the 11th International Conference on Industrial Management, 300-305, 2012
- 5) 橋本直, 拡張現実感プログラミング入門, アスキー, pp202-208, 2008
- 6) 安居院猛, 関根詮明, 入門OpenGLグラフィックス, 森北出版, pp130-134, 2001