

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 16 日現在

機関番号：24201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26350297

研究課題名（和文）モーションキャプチャを利用した実践的な機械加工訓練シミュレータの研究

研究課題名（英文）Practical training simulator for manual machining operation using motion capture system

研究代表者

橋本 宣慶（Hashimoto, Nobuyoshi）

滋賀県立大学・工学部・准教授

研究者番号：00433699

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,900,000円

研究成果の概要（和文）：安全性や経済性などの利点から開発されている汎用工作機械の訓練用シミュレータは、対象とする機械と操作感覚が異なったり、危険に対する注意力を養うことができず、効果的な訓練を行えるとは言えない。そこで本研究では、モーションキャプチャにより作業者の動作や実際の旋盤の操作器の状態を検出し、それをもとに仮想の作業訓練ができるシミュレータを開発した。これは訓練者の動作を常に監視し、その動作が危険なときに警告を行う。8名の被験者を使った実験により、ビデオ教材による作業学習を比較対象として、本システムの訓練効果について検討した。その結果、本システムを使った被験者の作業は誤操作や危険行為が少ないことがわかった。

研究成果の概要（英文）：Training simulators for manual machine tools using artificial reality have been developed for safety and economic. However, these have several problems: difference from the target machine in operating feeling, unable to warn dangerous behavior by a trainee and so on. Then, this study develop the training simulator using motion capture. This simulator provides the trainee with a virtual operating environment by detecting behavior of the trainee and state of the operating devices, levers and handles, on the actual lathe. In spite of safe virtual operation, the simulator can instruct safe operation. It constantly monitors the behavior of the trainee and warns when its behavior is dangerous. To evaluate the training effect of the system, experiments have been carried out, where quality of actual operation by eight testees is compared. As a result, it is found that operation by testee trained on the simulator is improved to be less operating error and dangerous behavior.

研究分野：生産加工学

キーワード：技能訓練 モーションキャプチャ 複合現実感 普通旋盤

### 1. 研究開始当初の背景

工場内の作業者が持つ技能は、自動化できない多品種少量生産、自動化された機械の設定や保守管理などにおいて不可欠である。その技能を引き継ぐ新規技能者の育成の重要性が再認識されるに伴い、高効率の訓練法として人工現実感技術を用いたシミュレータによる訓練が期待されている。この訓練は、危険を及ぼすものや消耗品などを実際には存在しない仮想物にすることで、訓練の安全性やコストパフォーマンスを高めることができる。そのため、様々な工場内の作業を対象にしたシミュレータが開発されてきた。手動操作で切削加工を行う汎用工作機械についても、安全のために高速回転する工作物や工具を仮想物体としたシミュレータが開発されている<sup>1)2)</sup>。これらには、次の問題点が挙げられる。

- ・工具送り以外の操作の訓練ができない。

従来のもは、手動の工具送りを適切な行う訓練に重点をおいており、対象機械の送りハンドルに模した専用のコントローラより操作する。それ以外の操作器（主軸起動スイッチや自動送りレバー等）は、キーボード入力などに置き換えている。しかし、実際の作業では送りハンドル以外の操作器も使用頻度が高く、それらの操作の習熟は重要である。そのためには、シミュレータのすべての操作器が実機と同等の感覚で操作できることが必要である。

- ・安全に関する訓練ができない

シミュレータでは、危険な工具や工作物を仮想物体に置き換えることで実際の作業よりも安全に訓練を行える。しかし、安全であるがためにゲーム感覚でシミュレータ作業を行うようになるため、安全教育の点からは必ずしも優れているとは言えない。訓練では危険に対する注意力を養うことが重要である。そのため、シミュレータは作業者を監視し危険な動作を行ったり、指さし確認などを怠ったりした時に警告することが必要である。

このような実践的な作業訓練は、モーションキャプチャにより作業者の動作や工作機械の状態を取得し、工作機械と切削加工をシミュレーションすることで実現できる。また、従来のシミュレータの対象とする機械は1つに限定しているのに対して、複数の機械を操作対象とすることも可能となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、モーションキャプチャを利用した複合現実感によって、実際の汎用旋盤に上で仮想の作業を行うことで、効果の高い訓練が行えるシステムを開発する。さらに、危険な行為に対して警告する機能と作業の手順を教示する機能を付加し、それによる訓練効果を実験により検討する。

### 3. 研究の方法

#### (1) 普通旋盤作業訓練用シミュレータ

##### ① シミュレータの構成

図1に示すように、本シミュレータはモーションキャプチャシステム (SPICE Optitrack Flex 3) と旋盤本体 (コスモキカイ L-6800)、ヘッドマウントディスプレイ (以下、HMD)、PCにより構成される。モーションキャプチャは、図2の丸印に示した再帰性反射マーカを作業者の上半身に取付け、これらを8台の赤外線カメラで撮影した画像から3次元位置を計算する。このマーカ位置から身体部位の位置を推定する。本シミュレータにおいて、両手およびHMDの位置は特に重要なので、互いの位置関係が既知な複数のマーカを取付けることで位置と向きを取得する。

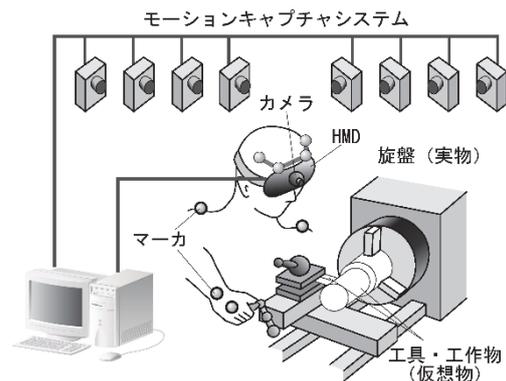


図1 シミュレータの構成

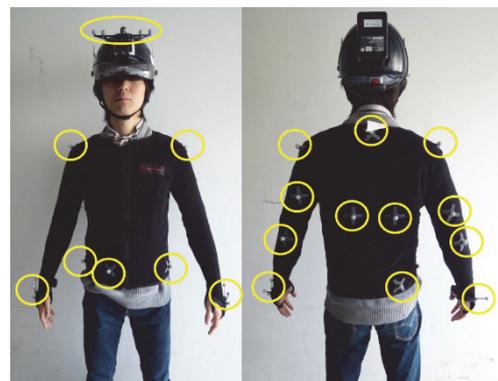


図2 身体に固定した反射マーカ

HMDは、ヘルメットの前面に小型カメラと市販のHMD (Sony HMZT3W) を取り付け、小型カメラによる撮影画像をHMDに出力することで、ビデオシースルーとしている。そこにカメラの位置に合わせて仮想物体をCGで重ね合わせることで、複合現実感の視覚提示を行う。その例を図3に示す。図のように、仮想物体は工具と工作物、チャックである。

旋盤本体はコントローラとして使用するが、主電源を切ることで作業者に危険がおよばない状態にしている。図4のように作業者は旋盤にある操作器（ハンドルやレバー）を動かしてシミュレータの作業を行う。操作器にマーカを貼り付け、その位置により操作量が取得できる。この情報に基づいて、旋盤動作および切削加工のシミュレーションを行う。前者では、レバーの状態を監視し、その状態が変化することで旋盤の動作状態が遷移するモ

デルを使用している．後者では，工作物は長手方向と周方向に要素分割し，その各要素の半径を設定する形状モデルを使用する．工具が干渉する工作物の要素の半径を，干渉した長さだけ変化させることで切削による形状変化を表現する．また，旋盤や切削の状況に合わせ，旋盤の主軸作動音や切削音をスピーカから出力する．

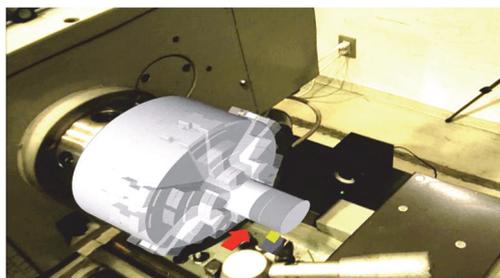


図3 視覚提示の例



図4 シミュレータによる作業の様子

以上のことにより，本シミュレータにおいて作業者は実際の旋盤を操作して仮想の加工を体験することができる．このとき，高速回転する工作物やチャック，大きな負荷がかかる工具などの作業者に危険をおよぼすものは仮想物体としているので，作業者は安全に保たれる．

#### ② モーションキャプチャによる複合現実感

複合現実感により旋盤上にある工具や工作物を視覚提示するには，図5に示す旋盤上の座標系 $(x_m, y_m, z_m)$ をHMDのスクリーン座標 $(x_s, y_s)$ に投影する行列 $\mathbf{M}_{ms}$ が必要である．この関係は次の式となる．

$$\lambda \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{ms} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{cs} \mathbf{M}_{hc} \mathbf{M}_{wh} \mathbf{M}_{mw} \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \\ 1 \end{bmatrix}$$

( $\lambda$  は任意の数)

ここで， $\mathbf{M}_{mw}$ は旋盤座標系からモーションキャプチャにおける座標系への変換行列， $\mathbf{M}_{wh}$ はモーションキャプチャ座標系からHMD上のマーカの座標系への変換行列， $\mathbf{M}_{hc}$ はHMDマーカ座標系からHMD上のカメラの座標系への変換行列， $\mathbf{M}_{cs}$ はHMDカメラ座標系からスクリーン座標系への変換行列である．モーションキャプチャから逐次得られる行列は， $\mathbf{M}_{wh}$ であり，そのほかの行列は事前に取得しておく

必要がある．なお， $\mathbf{M}_{cs}$ はカメラの内部パラメータなので，OpenCVのカメラキャリブレーションの機能を利用して求められる．

行列 $\mathbf{M}_{mw}$ は，旋盤におけるチャックと刃物台の動きから求める．図6のようにチャックの爪にマーカを貼りつけ，その座標をモーションキャプチャで測定しながらチャックを回転させた．マーカの軌跡となる円の中心を求め，そこを旋盤座標系の原点とした．また，刃物台に対してもマーカを貼りつけ，マーカの座標を測定した．刃物台に対して自動送りを使い，縦送りと横送りを行った．縦送りのときのマーカの軌跡から $z_m$ 軸，横送りのときの軌跡から $x_m$ 軸を決め，両軸に垂直かつ下向きを $y_m$ 軸の正方向とした．

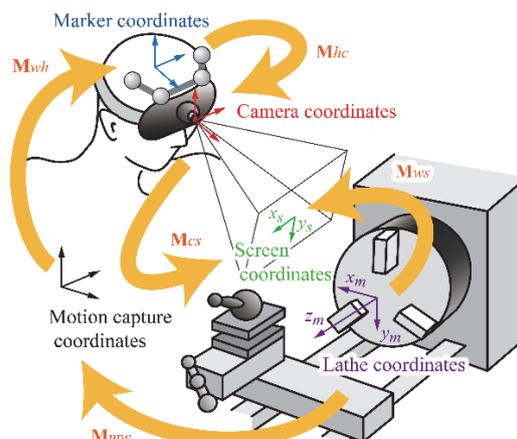


図5 複合現実感のための座標変換



図6 チャックと刃物台に貼りつけたマーカ

行列 $\mathbf{M}_{hc}$ は実験によって計測する．図7のようにHMDマーカ付きのカメラを固定し，旋盤上に置いた9個のマーカを撮影する．このときの行列 $\mathbf{M}_{wh}$ と旋盤上のマーカのモーションキャプチャ座標 $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$ も取得する．これをカメラとマーカの位置を変えて2回行う．なお，ここでの $i$ はマーカ固有の番号( $i = 1, 2, 3, \dots, 18$ )とする．一方，撮影画像(図9)を二値化することでマーカ部分を抽出し，その重心 $(x_{si}, y_{si})$ をマーカのスクリーン座標とした．これら18組の座標値から $\mathbf{M}_{hc}$ を最適化法により推定する．まず，3軸の並進移動 $(x_{tr}, y_{tr}, z_{tr})$ と回転移動 $(\theta_{tr}, \phi_{tr}, \psi_{tr})$ を行う

$M_{hc}$ により，下の式からスクリーン座標  $(x'_{si}, y'_{si})$  を求める．

$$\lambda \begin{bmatrix} x'_{si} \\ y'_{si} \\ 1 \end{bmatrix} = M_{cs} M_{hc} M_{wh} \begin{bmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ z_{wi} \\ 1 \end{bmatrix}$$

ここから，下の式で算出する評価関数  $e$  の値が最小になるように並進・回転移動の成分を探索する．

$$e = \sum_{i=1}^{18} \sqrt{(x'_{si} - x_{si})^2 + (y'_{si} - y_{si})^2}$$

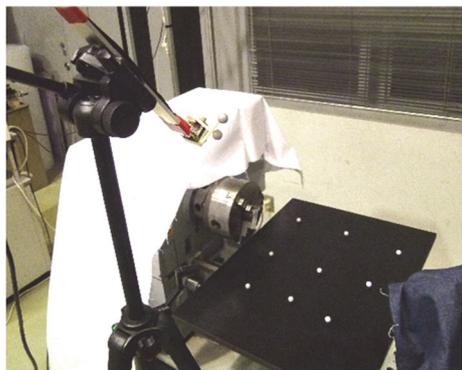


図7 行列  $M_{hc}$  を計測するための画像の取得

## (2) 教示機能

### ① 危険な行為に対する警告機能

汎用旋盤を用いた加工において，下記の危険な行為に関する警告機能を付加した．

- (a) 危険な範囲に作業者の身体が入る．
- (b) 旋盤などが破損する操作を行う．

項目(a)における危険範囲とは，主軸回転時におけるチャックや工作物の前方付近であり，作業者は工具の右側にいることが指導される．また，切削部に顔を近づけすぎないことも注意される．これらの具体的な範囲を決定するため，大学の実習指導員（熟練技能者）に図2のようにマーカを付けて外丸削りを行ってもらい，そのときの身体部位の位置を測定した．図8に結果を示す．図中の座標  $(x_t, y_t, z_t)$  は工具先端を原点として， $x_t$  と  $z_t$  の方向は旋盤の  $x$  および  $z$  座標と同じであり， $y_t$  は2軸に直行し下向きを正とする．図より身体は  $z_t > -29\text{mm}$  の範囲にあり，頭部は工具先端から300mm以上離れていることがわかる．これにより，身体に対しては  $z_t < -50\text{mm}$ ，頭部に対しては工具先端から300mm以内の範囲を危険領域とした．ただし，往復台の操作を行う際，右手が危険範囲に入ることが避けられないため，右手の危険範囲は  $z_t < -150\text{mm}$  とした．シミュレータ作業では，危険領域に1秒以上入ったときに警告音を鳴らし，さらに1秒経過したときに画面上部に警告メッセージを表示させる．

項目(b)における操作とは，チャックハンドルを使用後にチャックから外すこと，主軸回転数の切り替える際に主軸台内の歯車を確実に噛み合わせることにした．このために，チ

ャックハンドルおよび主軸回転数設定レバーに反射マーカを貼り付け，これらの位置を監視する．正しい操作が行われていない場合には，警告メッセージを出力する．

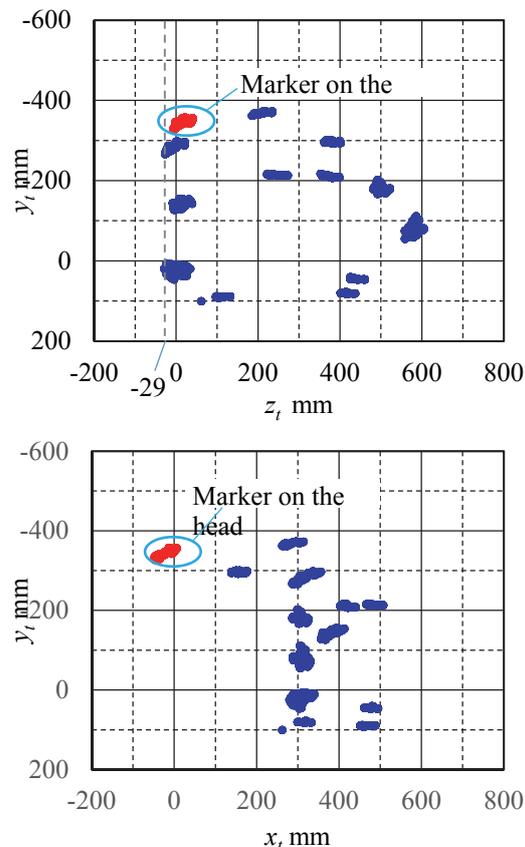


図8 技能者の作業におけるマーカ位置

### ② 操作の教示機能

本研究が対象とする旋盤作業は心押台を使わないチャックワークである．すなわち，主軸回転数を設定し，主軸を回転させ，工具を動かして切削を行い，主軸の回転を止めるという手順の作業であれば対象となる．この作業は，旋盤の機種にもよるが，回転数設定レバーと主軸起動レバー，工具送りハンドルの操作である．

レバー操作の教示は，図9のように，実物と同寸法で赤色の仮想物体のレバーと矢印により，どのレバーをどの位置に動かすのかを指示する．工具送りハンドルでは，早送りの場合は図10(a)のように動かす方向を仮想物体の矢印により指示する．切削送りの場合は動かす方向と速度を指示するため，図10(b)のように円板状で周囲に縞模様のある仮想物体を2つ並べて配置する．その1つは教示円板と呼び，正しい方向と速度で常に回転している．もう1つは操作円板と呼び，作業者が操作しているハンドルの回転と同期して回転する．作業者はこの両者の回転速度を比較しながら直感的に正しい送り速度を訓練する．

本シミュレータでは，レバーやハンドル操作の教示を組み合わせ，外丸削りの作業手順を教示する機能を付加している．

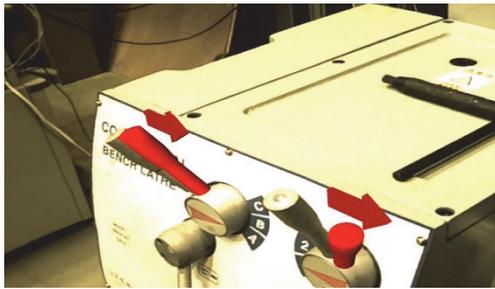
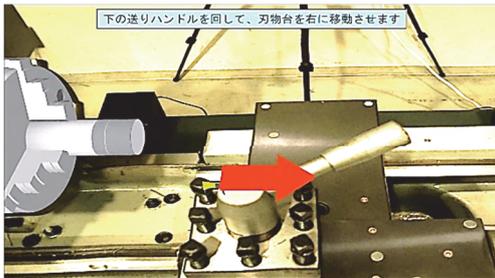
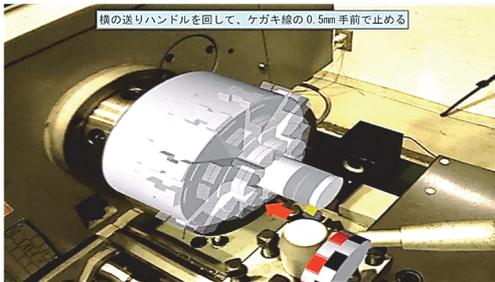


図9 レバー操作の教示方法



(a) 早送り



(b) 切削送り

図10 送りハンドル操作の教示方法

### (3) 訓練効果の検討

#### ① 実験方法

本シミュレータによる訓練の効果を検討するため、ビデオ教材による作業の学習を比較対象とした実験を行う。被験者は工学部学生8名であり、旋盤の実習経験が数時間程度の初心者である。シミュレータで訓練するグループSと比較対象とするビデオ教材で学習するグループVを各4名に分けた。訓練対象は、図9に示す直径40mmの工作物を直径39mmにする加工に対して、1パスの荒削りと1パス仕上げ削りを行う作業とした。

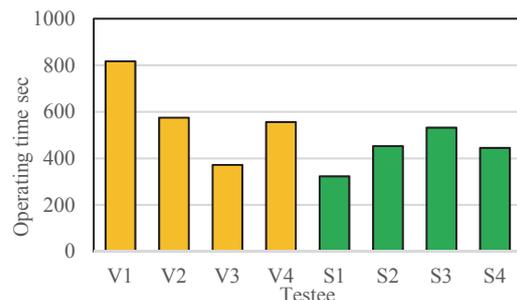
ビデオ教材は、機械加工実習担当技術職員と相談して作成したものである。シミュレータとの条件を合わせるため、説明に使用する音声や文章は極力同じものを使用した。また、シミュレータでは、被験者が訓練を進める速さを決めることができるが、一般的なビデオ教材では映像が決まった速さで流れるため、内容の理解ができない場合がある。そのため、映像を手順ごと一時停止し、キー操作で次に進むようにしている。

実験は、はじめにシミュレータ群はシミュレータによる訓練を1回、ビデオ群はビデオ教材による作業の学習を1回行う。次に、実際の旋盤を用いて対象作業を行う。ここで使

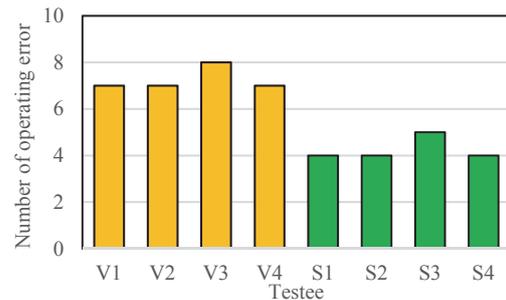
用する旋盤は、シミュレータで利用しているものである。作業中に被験者が間違えた操作や危険な行為を行おうとした場合に口頭で注意し、その回数を記録する。

#### ② 結果および考察

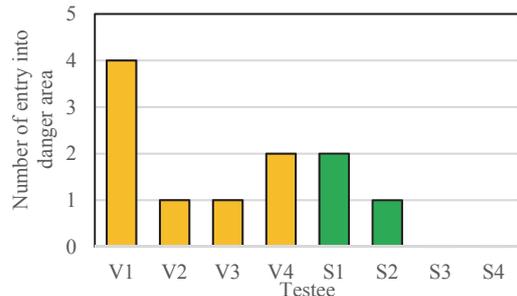
実験結果を図11に示す。図ではグループVの被験者をV1~V4、グループSの被験者をS1~S3で示している。図よりグループSの方がグループVよりも短い時間で作業を終えている。図11(a)は作業の手順を間違えた回数であり、被験者が次に行う作業がわからずに質問した回数も含めている。図ではグループSの方がグループVよりも回数が少ないことがわかる。図11(a)と図11(b)の結果から、シミュレータ訓練の方が手順をよく覚えられていることを示している。図11(c)は危険行為の回数を示し、ここでの危険行為は、工具や工作物の正面に立つことである。被験者V1が多く指摘をされていることから、ビデオ教材では危険に対する意識を養えない場合があることがわかる。また、被験者S3は十分に危険領域を避けて作業を行うことが身についていて、シミュレータでは全被験者で危険に対する意識が養えていることがわかる。



(a) 作業時間



(b) 手順を間違えた回数



(c) 危険行為の回数

図11 実験結果

#### 4. 研究成果

本研究では、モーションキャプチャシステムを利用して、実際の作業に近い訓練を行えるシミュレータを開発した。本システムの訓練効果を検討するため、ビデオ教材による作業手順の学習を比較対象として、被験者を使った実験を行った。その結果、本システムの方が誤操作や危険行為を少なくさせる傾向があった。

#### <引用文献>

- ① 黎子椰, 樺澤崇, 丘華, 佐野浩: “旋盤操作技能教育・訓練用シミュレータの機能開発による性能改善”, 日本産業技術教育学会誌, Vol. 47, No. 3, pp. 183-192 (2005).
- ② 橋本宣慶, 御簾納陽介, 加藤秀雄: “実機を利用した汎用工作機械作業の複合現実感システム”, 精密工学会誌論文集, Vol. 77, No. 12, pp. 1175-1179 (2011).

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 4件)

- ① 橋本 宣慶、モーションキャプチャを利用した機械加工作業シミュレータの訓練効果、設備管理学会春季研究発表大会、2017年6月1日、早稲田大学(東京都・新宿区)
- ② 橋本 宣慶、モーションキャプチャを利用した実践的な機械加工作業訓練シミュレータ—安全な作業と手順の教示—、精密工学会春季大会学術講演会、2017年3月14日、慶応大学(神奈川県・横浜市)
- ③ 橋本 宣慶、モーションキャプチャを利用した機械加工作業訓練のための普通旋盤のシミュレーション、知覚情報研究会、2017年2月23日、広島市立大学(広島県・広島市)
- ④ 橋本 宣慶、モーションキャプチャを利用した実践的な機械加工作業訓練シミュレータ—基本システムの開発—、精密工学会秋季大会学術講演会、2016年9月7日、茨城大学(茨城県・水戸市)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

橋本 宣慶 (HASHIMOTO, Nobuyoshi)  
滋賀県立大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00433699