シミュレータによる旋盤の芯出し作業の訓練*

橋本宣慶** 加藤秀雄*** 青宿淳一† 樋口静一*** 大川一也††

Training of Workpiece Centering Operation on Lathe by the Simulator

Nobuyoshi HASHIMOTO, Hideo KATO, Junichi AOYADO, Shizuichi HIGUCHI and Kazuya OKAWA

Many lathe simulators for acquiring skill to fabricate machine parts with a lathe have been already studied and developed. However, there is no simulator for training workpiece centering operation on a lathe, which is known as a high level skill required one. This paper deals with development of a simulator for the operation and its training effect. The simulator developed is composed of the working platform with the clamp-force-adjustment-device, an impulse hammer, a LCD monitor and a PC. A virtual workpiece clamped with a virtual chuck, a virtual test indicator and a virtual hammer are shown in the monitor. A trainee can check eccentricity of the workpiece by using the test indicator and reduce it by adjusting the clamp force and hammering. To confirm the effectiveness of the simulator, skill training examinations by trainees were carried out. As the result, it is found that the simulator improves the centering skill on actual machine operation. In addition, it is clarified that hammering skill is more difficult to learn than clamp-force-adjustment skill.

Key words: workpiece centering skill, positioning skill, lathe operation, skill training, simulator

1. はじめに

生産現場において、作業者による手作業は依然として必要とされている。手動操作による切削、鋳造、鍛造、溶接などの加工作業、自動化機械の設定操作や保守管理の作業は少なからず技能が必要とされ、これらを修得した者は技能者と呼ばれている。古くから技能者の育成では、初心者を実際の作業を行わせながら、教師である技能者が自身の経験に基づき適時に助言するという方法で行われてきたが、この方法では長い時間や労力、訓練で使う機械を占有することによるコストを必要とする。この問題の解決を目的として、シミュレータによる訓練が研究されてきた^{1)~4)}。

旋盤作業においてもシミュレータは多く開発されており、NC旋盤の操作方法を習得させるもの⁵⁾や汎用旋盤の工具送り操作を訓練させるもの^{6)~8)}がある。また、加工前の準備作業である段取り作業を対象とするシミュレータも少なからず存在する。黎ら⁹⁾によるものは、画面上に「作業開始(安全確認)」、「工作物取付」、「チャックハンドル抜き」などのボタンを表示し、これらを決められた順番通りに選択していくことで段取りの手順を学習させる。また、大橋¹⁰⁾は、熟練技能者が行う作業から取得した段取りに関するデータベースをもとに、適切な段取り方法を選択するため学習システムを提案している。しかし、段取り作業の中でも難しいとされている芯出し作業¹¹⁾を対象としたものはない。

芯出し作業はハンマによる打撃とチャックハンドルによる締付けにおける力加減が重要であり、加工プロセスに直接関わらないが製品の品質とコストに大きく関わる。そこで、本研究では旋盤における芯出し作業を訓練するシステムを開発し、その訓練効果と作業動作における難易度に関する検討を行った。

2. 旋盤における芯出し作業

旋盤のチャックにより工作物を主軸に固定する際、偏心している、つまり主軸の回転中心軸に対して工作物の中心軸がずれてしまうと、削り代を大きくしなければならなかったり、段付き部品など場合にはアライメント誤差を生じることになる。そのため、なるべく両軸を一致させる必要があり、通常では工作物を三爪スクロールチャックで固定すれば、工作物の中心軸と主軸の回転軸が一致する。しかし、爪と工作物の接触長であるつかみ代が短い場合などでは偏心が生じる。これを修正することが本研究の対象とする芯出し作業である。

具体的な芯出し作業の手順は以下のようなものである。図1のようにダイヤルゲージを工作物に当て、チャックを手で回しながら工作物の外周の振れを読み取り、そこから偏心の距離(以下、偏心量と呼ぶ)と偏心の方向(以下、偏心角と呼ぶ)を推定する。偏心角をダイヤルゲージと反対の方向に移動させ、図に示す方向からハンマにより工作物に打撃を与えることで工作物の位置を変化させ偏心を小さくする。また、チャックが工作物を固定する力(締付け力)が大きいと、打撃力が同じでも工作物のずれる量は小さくなるため、チャックハンドルに加えるトルクを調整することも必要となる。作業者は振れがなくなるよう、工作物の回転移動、締付け力調整および打撃を繰り返し、最終的に十分な力で締付ける。

Fig.1 Centering operation on lathe

* 原稿受付 平成 24 年 7 月 27 日

** 正 会 員 青山学院大学理工学部(神奈川県相模原市中央区淵野辺 5-10-1)

*** 正 会 員 千葉大学大学院工学研究科(千葉県千葉市稲毛区弥生町 1-33)

† 千葉大学大学院工学研究科(現, TDK)

†† 千葉大学大学院工学研究科

Fig.3 Display image on the LCD

3. シミュレータ

3.1 シミュレータの概要

訓練シミュレータのハードウェア構成を図2に示す。本シミュレータは、作業台、インパルスハンマ、液晶モニタおよびシミュレーションを行うPCから構成される。液晶モニタには図3のように、工作物を取り付けた旋盤のチャック、ハンマ、ダイヤルゲージが表示されている。作業者は画面中のダイヤルゲージの針を見ながら、PCのキーボード操作によりチャックを回転させることで、シミュレータ訓練における工作物の偏心の状態を確認できる。

作業台には、チャックハンドルを模した締付け力入力デバイス、工作物を模した金属棒、金属棒の周辺を上方から撮影するためのCCDカメラが一体となって設置されている。締付け力入力デバイスとインパルスハンマ (Dytran Instruments Inc. 5800B3) はPC内の12bit A/D変換ボード(ADLink Technology Inc. PCI-9111DG)に接続している。図4に示す締付け力入力デバイスは回転させることができないが、チャックハンドルを回すように加えられたトルクを、歪ゲージを用いたトルクセンサにより検出することで工作物の締付け力を入力することができる。また、実際にはハンマで工作物に与える打撃力は、インパルスハンマで金属棒に打撃を与えることで入力する。インパルスハンマには、図5に示す位置に2個の赤色マーカが付けてあり、それを作業台のCCDカメラが撮影する。その画像(図6(a))を2値化し抽出したマーカの重心位置(図6(b))から、軸方向における打撃の位置を検出する。また、カメラのピクセル間距離はハンマの位置において約0.4mmであり、画像処理によるマーカ位置の測定誤差は1mm以内である。なお、入力された締付け力と打撃力の大きさは液晶モニタに表示され、それを見ながら作業を行うことができる。

3.2 打撃の測定と判別

ハンマにより工作物に与えられる打撃力波形の例を、図7に

Fig.4 Clamp force adjustment device

Fig.5 Impulse hammer

(a) Camera image of impulse hammer

(b) Detected markers

Fig.6 Detection of impact position

Fig.7 Example of Impact force signal

(a) Raw force signal

(b) Noise-reduced force signal

Fig.8 Detection of impact

示す。予備実験により打撃時間は8~12ms程度であったため、打撃力は約16kHzのサンプリング周波数でAD変換することとした。打撃力波形のサンプリング開始は力の大きさが10N以上、時間的变化が10kN/s以上となった時とし、終了は力が10N以下、時間的变化が-10kN/s以下となった時とした。また、検出された打撃時間が7~15msの範囲以外のものは、打撃とみなさずに除くこととした。図8に打撃力波形の検出結果の例を示す。図8(a)は続けて4回の打撃を行った時の生波形であり、非打撃時のハンマの加速度変化などに起因するノイズが現れている。これに対して図8(b)は上記の条件に基づき打撃力波形のみ取り出した結果であり、ノイズを誤認識していないことがわかる。

4. シミュレーションモデル

図9(a)に三爪チャックの爪と円柱状工作物からなるモデルを示す。三爪チャックは把持部において工作物の中心軸と主軸の回転軸が一致する機構と高い剛性を持っている。また、固定する工作物の回転軸に対する傾きは非常に小さく、それを修正するための打撃は軸方向に対してほぼ垂直に行われるため、軸方向に負荷される力は極めて小さい。したがって、工作物に固定された座標系において、簡単化のために工作物はその中心線が必ず原点を通り、半径方向と軸方向へのずれは起こらずに、x

軸と y 軸回りへのずれしか起こらないものとする。すなわち、軸方向と半径方向への並進移動は無視し、工作物の位置を x 軸および y 軸回りの傾き ϕ_x rad, ϕ_y rad のみで表す。120° 間隔に配置された三つの爪 (Jaw 1~3) は、すべて z 軸から r' mm 離れた場所にあるものとし、各爪が工作物に及ぼす力は、締付け力 $F_{c1} \sim F_{c3}$ N, 締付け力の分布に起因するモーメント $M_1 \sim M_3$ Nmm, 工作物との摩擦 $F_{f1} \sim F_{f3}$ N のみとする。ハンマによる打撃は、図に示す z_h の位置で θ_h rad の方向から打撃力 F_h N が与えられるとする。また、締付け力はチャックハンドルに付加されるトルクの作業中における最大値に比例する。なお、実際の作業において締付けトルクを弱めようとする、工作物への締付け力はなくなり、偏心量や偏心角が変わる。これはその状態から作業をやり直すことと同じであるため、本シミュレータにおいて締付けトルクは弱められないものとした。以上のことから、 x 軸および y 軸回りのモーメントのつり合いは、式(1), (2)で表される。

$$I \frac{d^2 \phi_x}{dt^2} = z_h F_h \sin \theta_h + (M_2 + r' F_{f2} + M_3 + r' F_{f3}) \sin \frac{\pi}{6} - M_1 - r' F_{f1} \quad (1)$$

$$I \frac{d^2 \phi_y}{dt^2} = -z_h F_h \cos \theta_h + (M_2 + r' F_{f2} - M_3 - r' F_{f3}) \cos \frac{\pi}{6} \quad (2)$$

t : 時間 s I : 工作物の慣性モーメント kg・mm²

図 9(b) は、Jaw i ($i=1,2,3$) の工作物把持面に直交し中心軸を通る面における断面図である。工作物は右端において e_i mm ずれているとき、爪は工作物に食い込み、その深さに比例した（比例定数を k N/mm² とする）分布荷重が発生するものとする、その総和が締付け力 F_{ci} である。以上のことから、締付け力、摩擦係数、原点周りのモーメント M_i Nmm は以下の式で求められる。

$$F_{ci} = \frac{kb(D-2r')}{4} \quad (3)$$

$$M_i = \frac{ke_i b^3}{24l} \quad (4)$$

$$F_{fi} = \mu_i F_{ci} \quad (5)$$

式(5)の μ_i は、静摩擦係数 μ 、動摩擦係数 μ' や工作物の動きにより決定される値である。具体的には、工作物が静止しているとき、 $-\mu < \mu_i < \mu$ の範囲において式(6)で求める工作物の角加速度 α rad/s² が最小となる値とする。工作物は、 $\alpha = 0$ のとき静止したままであり、 $\alpha > 0$ のとき動き始める。

$$\alpha = \sqrt{\left(\frac{d^2 \phi_x}{dt^2}\right)^2 + \left(\frac{d^2 \phi_y}{dt^2}\right)^2} \quad (6)$$

工作物が動いているとき、動摩擦は把持面にて工作物が滑る方向の逆に働く、すなわち $de_i/dt \geq 0$ のとき $\mu_i = \mu'$ 、 $de_i/dt < 0$ のとき $\mu_i = -\mu'$ とする。

本シミュレーションで使用するモデルの定数値を表 1 に示す。表中の μ , μ' , k は、作業を行ったときの偏心の変化が実際と近くなるよう試行錯誤的に決定した。この計算において打撃開始直後から工作物が停止するまでの時間は数 10ms であり、この間

Fig.9 Simulation Model

についてだけモデルを計算すれば十分である。そのため、本シミュレーションでは力波形のサンプリング間隔ごとに計算するのではなく、打撃力波形を検出した直後に行うこととした。

本モデルの精度を実験により検討した。実際の旋盤上に固定した工作物に対して打撃を与え、チャック端から 145mm 離れた工作物中心位置を打撃前後に測定する。その際に測定しておいた締付けトルク、打撃力波形、打撃方向をシミュレーションモデルに適用した打撃後の工作物中心位置を比較した。実際と計算における移動距離の差は平均 0.03 mm、移動方向の差は平均 21° であったが、打撃の角度と偏心角との差が 6° 以内の場合、つまり正しく偏心角の方向から打撃を与えた場合、移動距離の差は平均 0.01 mm、移動方向の差は平均 11° であった。また、ほとんどの計算結果は実際よりも移動後の中心位置が原点の近くにあった。すなわち、本シミュレータでは実際よりも偏心量が小さくなる傾向にあり、実際の作業に比べてシミュレータにおける作業の難易度は多少低いと考えられる。

5. シミュレータの評価

5.1 シミュレータによる訓練の効果

構築したシミュレータを用いた訓練における被訓練者の習熟過程を検討するため、被験者による作業実験を行った。被験者は機械工学を専攻している 20 代男子大学生 6 名（被験者 1~6）であり、いずれも旋盤の実習経験は数時間あるものの芯出し作業は未経験である。これらの被験者に対して、2 章で述べた作業のコツを説明した後でシミュレータによる 15 回の芯出し作業を行わせた。具体的には、毎回、初期の締付けトルクを 3.0Nm、偏心量を 0.2~0.5mm の範囲でランダムに決めた状態とし、本締めトルク 10Nm、偏心量が 0.015mm（ダイヤルゲージの指針の振れ幅が 0.03mm）以下となるまで調整を行わせた。

図 10 は被験者 1 の作業回数に対する作業時間の関係を示す。図からわかるように作業回数が増加するにつれて徐々に作業時

Fig.10 Operation time by testee 1

Fig.11 Average operation time on three training stages

間は減少し、すなわち典型的な習熟曲線を描いており、11～15回目ではほぼ定常状態に達している。他の被験者についてもほぼ同様であった。図11は、各被験者における5回毎の平均作業時間である。図より、被験者5以外の全員において訓練初期5回よりも訓練後期5回の作業時間が短く、訓練により作業効率が向上することがわかる。この結果は、本シミュレータに訓練効果があることを示す。なお、被験者5は訓練初期から作業時間が短く、向上の余地がなかったものと考えられる。

作業効率を向上させるためには、適切な打撃を与えることで打撃回数を少なくすることや、偏心角の方向から打撃を与えることが重要である。作業5回毎の平均打撃回数を図12に、平均打撃角度誤差を図13に示す。ここで打撃角度誤差とは偏心角と打撃の角度との差であり、打撃を与える方向の正確さを意味する。図12の被験者1、4と図13の被験者1、3において、訓練初期5回よりも訓練後期5回の平均が大幅に改善されたことがわかる。被験者2、6は、両図において習熟傾向が認められないにもかかわらず作業時間を短縮させているため、作業の動作が素早く行えるようになったといえる。以上のことから、被験者は訓練前に理解した作業のコツをすべて改善しようと意識して作業を行っておらず、被験者によって改善を試みたコツが異なっていたと考えられる。

5.2 実作業とシミュレータ作業における技能の関係

前節でシミュレータ訓練における技能の向上が確認できたが、これが実際の作業の技能に結びつかなければ、本システムが有効な訓練システムであるとは言えない。そこで、被験者にシミュレータによる作業と実際の作業の両方を行わせ、両技能の相関を調べた。被験者は前述と同様の男女6名（被験者7～12）であり、芯出し作業の未経験者から十分に実習を積んだ者までとして実際の作業における技能に大きな差が存在している。これらの被験者に対して、実機旋盤とシミュレータで各7回の芯出し作業を行わせた。作業内容は、5.1節と同じである。また、被験者7～9はシミュレータの作業の後に実機旋盤の作業を行い、被験者10～12はその逆の順番で作業を行う。両被験者の結果を合わせて検討することで、作業順序が作業結果に及ぼす影響を除去する。

各被験者の両作業における作業時間と打撃回数の比較を図14

Fig.12 Average number of impact on three training stages

Fig.13 Impact angle error on three training stages

Fig.14 Relation between actual operation and the simulator operation

に示す。ただし、図中の囲い付番号は被験者番号であり、プロット点はその被験者による7回の作業における最小値（最良値）から3位までの平均値である。図中の線は回帰直線であり、実作業とシミュレータによる作業の間にはかなりの相関があることがわかる。この結果は、シミュレータの作業において作業時間が短く打撃回数の少ない被験者は実作業においても同様であることを示す。したがって、未熟練者が本シミュレータを用いて訓練すれば、実作業における技能を身につけられると考えられる。なお、被験者全員の作業時間と打撃回数において、実作業よりもシミュレータによる作業の方が少ないが、前章で述べたようにシミュレータによる作業が実作業より難易度が低いことに関係していると考えられる。

5.3 打撃力と締付け力の調整における難易度の検討

芯出し作業では、適切な大きさと方向の打撃を工作物に与えることと、適切な締付け力を与えることが要求される。すなわち、芯出しの技能は、打撃に関する技能と、締付けに関する技能を総合したものといえる。これらの個別の技能による総合的な技能への影響については、実作業で検討することは難しいが、シミュレータを用いれば可能となる。技能の難易度を知り、重点的に訓練すべき技能を設定することで、効率的な芯出し作業の訓練を実現できると考えられる。そこで、被験者に異なる条件でシミュレータによる訓練を行わせることで打撃力と締付け力を調整する技能の難易度について比較検討した。

訓練条件は打撃力と締付け力の入力方法の違いにより3種類

あり、それを表2に示す。表中のSim1の条件では両方の力を本シミュレータのインパルスハンマと締付け力入力デバイスにより入力し、Sim2とSim3の条件では片方の力をキーボードで数値入力することとしている。なお、Sim2では打撃力のピーク値を数値入力するが、その波形は周期16msの正弦波の半波とした。被験者は前述と同様の男女5名（被験者13～17）であるが、いずれも旋盤の実習経験は数時間あるものの芯出し作業は未経験である。各被験者にはSim1～Sim3の各条件に対して10回ずつ、計30回のシミュレータ作業を行わせた。ただし、条件は続けて同じものにならないよう、かつ一定の順序にならないよう設定した。

被験者15の作業回数に対する作業時間の関係を図15に示す。図から6回目の作業以降で作業時間がほぼ一定値に収束する傾向がみられ、これは他の被験者についてもほぼ同様であった。いずれの条件についても訓練の前半で被験者は適切な締付け力と打撃力の大きさを修得できたと推測される。そこで、訓練後半の6～10回目の平均作業時間と平均打撃回数を各条件に関して比較することとした。それらの結果を図16、17に示す。図中のエラーバーは標準偏差を示す。図より、平均作業時間には条件による差がみられないのに対して、平均打撃回数はほとんどの被験者のSim2が他より少ないことがわかる。分散分析を行ったところ、被験者14～16のSim1とSim2の間の打撃回数において有意水準5%未満で有意差が認められた。このことから、打撃力の印加は数値入力よりインパルスハンマによる方が難しく、締付け力入力デバイスでは違いがないといえる。これは打撃力調整技能の方が締付け力調整技能よりも難易度が高いことを意味する。なお、インパルスハンマによる打撃が短時間で終わるのに対して、数値入力では時間がかかるため、Sim2の作業で打撃回数が減少しても作業時間は減少しなかったと考えられる。

6. おわりに

本研究では、旋盤における芯出し作業を訓練するシミュレータを開発し、その訓練効果を検討した。また、シミュレータの特徴を生かし、打撃力調整技能と締付け力調整技能に関する難易度の検討を行った。得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) シミュレータによる訓練で作業時間と打撃回数を減少することができる。
- (2) シミュレータによる訓練で作業時間と打撃回数をより減少できる被験者は、実作業においてもこれらを減少できているので、本シミュレータは未熟練者の技能訓練に有用である。
- (3) 打撃力調節技能と締付け力調整技能では前者の方が後者より難易度が高い。

(3)の結論から、難易度の高い打撃力調節技能のみに集中した訓練を行うことで、訓練の効率を高められると考えられる。そのような訓練を実機で行うことは難しいが、本シミュレータを利用することで実現可能であり、今後、検討する予定である。

本研究の遂行に協力いただいた千葉大学学生の佐藤裕紀君、実験の被験者として協力していただいた千葉大学工学部機械工学科知能機械システム研究室の学生諸君に深く感謝する。

参考文献

- 1) WATANUKI Keiichi, KOJIMA Kazuyuki: Virtual Reality Based Job Training for Advanced Manufacturing Skills, The International Conference on Business & Technology Transfer, (2006), 134.
- 2) 橋本宣慶, 御簾納陽介, 加藤秀雄, フライス盤操作シミュレータによ

Table 2 Three different conditions of simulator operation

Symbol	Clamp force	Impact force
Sim1	By clamp force adjustment device	By impulse hammer
Sim2	By clamp force adjustment device	Numeric input
Sim3	Numeric input	By impulse hammer

Fig.15 Operation time by testee 15

Fig.16 Average of operation time for three different conditions

Fig.17 Average number of impact for three different conditions

る加工順序学習とハンドル操作技能訓練の効果, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 4, 16(2011), 559.

- 3) Aritz Ustarroz, Alberto Lozano, Luis Matey, Jens Siemon, Diana Klockmann, Miren Iosune Berasategi: VIRTOOL - Virtual Reality for Machine - Tool Training, Mécanique & Industries, 5(2004), 207.
- 4) Nobuyoshi Hashimoto, Hideo Kato, Experimental identification of model parameters in welding simulator and its performance evaluation by veteran welders, 18th International Conference on Artificial Reality and Telexistence, (2008), 289.
- 5) Ernesto Imperio, Marco Sacco, Claudio R. Boer: Virtual reality system for machining: A virtual lathe prototype, International Conference on Education in Manufacturing, ER96-223(1996), 13.
- 6) 小池俊介, 綿貫啓一, 楓和憲, 村上大輔, バーチャルトレーニングとOJTを融合した旋盤加工技能伝承, 設計工学・システム部門講演会講演論文集, 19(2009), 526.
- 7) 小林一彦, 橋本宣慶, 加藤秀雄: 複合現実感による中ぐり旋盤作業のシミュレーション, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 4, 4(1999), 685.
- 8) 梁馨, 加藤秀雄, 樋口静一, 大川一也, 仮想環境による中ぐり旋盤作業の高性能技能訓練, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 4, 16(2011), 533.
- 9) 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, 47, 3(2005), 183.
- 10) 大橋和正, 旋盤作業段取りの訓練計画に関する研究, 生産管理, 2, 11(2005), 159.
- 11) 技能士の友編集部, 技能ボックス (3) / 旋盤のテクニシャン, 大河出版, (1971).