

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 18 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21700824

研究課題名（和文） 身体動作と筋活動を教示する技能訓練システム

研究課題名（英文） Training system to gain required body and arm movements and control in manual arc welding

研究代表者

橋本 宣慶 (HASHIMOTO NOBUYOSHI)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：00433699

研究成果の概要（和文）：本研究は、被服アーク溶接作業の訓練を効率化させるため、腕の動かし方と力の使い方を教示する溶接訓練用シミュレータを構築した。被訓練者の上腕部と前腕部に32個の振動モータを取り付け、これらを作動させる順番により腕関節を動かす方向と力を入れる位置を指示する。指示する内容は、作業中の腕関節の動きと筋肉の活動状態の測定を、技能者と初心者にたいして行うことで両者の違いを見出した。本シミュレータによる訓練の効果は、実験により確認できた。

研究成果の概要（英文）：The researcher built the training simulator to teach required body control and movements: 32 vibration motors attached to their upper and forearms tells them the appropriate maneuver of arms and posture for an ideal operation. Each running sequence of motors registers operator's movements and improves the movements of the operator by instructing. The information directing appropriate movements to the operator had been acquired by sampling the performance of both veteran welders and trainees. The result of the experiment confirms that the simulator is effective.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	200,000	60,000	260,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：教育工学

キーワード：バーチャルリアリティ, ヒューマセンタード生産, 教育工学, 生産工学

## 1. 研究開始当初の背景

知能化、ロボット化が叫ばれる現今においても、多くの生産現場で熟練者の技能は必要とされている。熟練技能者でなければ扱いが難しい製造工程は未だに数多く存在し、工程を最適化しようとする際にもその動きが参考にされることは少なくない。そのため今後も熟練技能者の持つ高度な技能の存在は重

要であり、それを後世に伝えること、すなわち技能者の育成(技能伝承)は重要な課題である。

特に溶接分野では安全で効果的な技能伝承が切望されている。溶接とは放電やガスの燃焼で発生する熱により金属を接合する加工法であり、種々の構造物や大型部材のほとんどが人間の手による溶接作業により組み

立て製作されている。この作業は接合部に対して一定の隙間を保つように溶接トーチや溶接棒を動かしていくもので、作業者の技能が品質に影響しやすい。また、新規技能者に対する訓練では火傷や火災などの危険も伴う。

一方、技能伝承に関する課題を解決する方法として、人工現実感技術を利用した訓練が有効と考えられている。この技術は、視覚、聴覚、触覚等の感覚を呈示する機器を用いて、コンピュータで構築した仮想空間を操作者に体験させることができる。安全、低コスト、繰返しの容易性などの理由から技能教育にも用いられ、工業分野や医療分野において熟練技能者の技能を未熟練者に伝達する試みも行われている。

溶接の分野においても、訓練を目的としたシミュレータを開発している。これらの多くのシミュレータには、理想的な工具の動きや熟練者の動きと訓練者の作業を比較・評価し改善点を提示する教示機能が備わっている。訓練者の工具を制御する能力の範囲内で作業が改善可能な訓練初期において、この機能は効果を発揮する。しかし、訓練が進み技能が向上するにしたがって訓練者の工具制御能力の範囲以上の操作が要求されるようになる。このとき訓練者は、提示される情報を理解してもそれを反映できない状態、すなわち、教示されることに対して「わかっているが、できない」という状態に陥る。これは、教示機能が訓練者の工具制御能力以上の操作を要求しても技能は向上しないことを意味する。そして、このような状態の訓練者には工具制御能力を向上させるための教示を行うべきである。

## 2. 研究の目的

本研究では、訓練者の工具制御能力の向上を目的とした体の動かし方と力の使い方を教示する方法を提案する。溶接作業において体を動かし力を使う部分は、ほぼ工具を持つ腕のみであるので、多数の振動モータを作業者の腕に配置し、これらのモータを振動する順番（以下、振動パターン）により動作の教示を直感的に行う。この装置を既存の溶接作業訓練システムに組み込み、訓練効果を以上の方法で訓練者の身体動作と筋活動を直感的かつ同時に教示する技能訓練システムを開発する。

## 3. 研究の方法

本研究で対象とする作業は被覆アーク溶接の下向きのビードオンプレート作業である。溶接棒は素線径 $\phi 3.2$ のD4143として、溶接母材はSS400の $150 \times 150$  t4.5で、溶接距離は150mmである。なお、本研究は、溶接開始と終了における25mmを除いた

100mmの部分における作業を対象としている。また、作業者と溶接母材の位置関係は図1に示す通りとした。

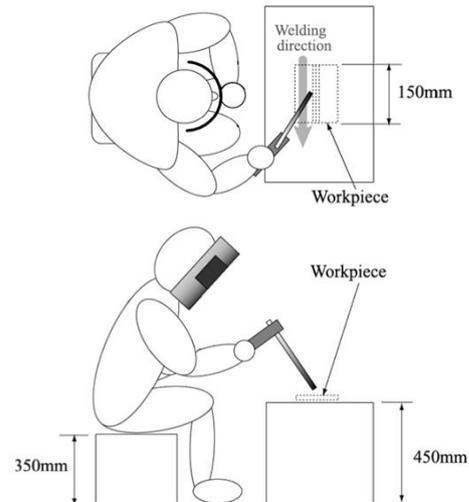


図1 作業者と溶接母材の位置関係

### (1) 作業中の身体動作および筋活動の測定

溶接作業中の身体動作および筋活動の測定を行う装着具を製作する。これは、モーションセンサおよび表面筋電位計により肩、肘、手首の関節角度と橈側手根伸筋、橈側手根屈筋、尺側手根伸筋、尺側手根屈筋、上腕二頭筋、上腕三頭筋の活動状態を取得するものとする。これを用いて溶接の技能者と初心者である被覆アーク溶接作業を行うときの身体動作、筋活動を測定する。溶接初心者である機械工学を専攻する作業初心者の大学生の6名と、技能者である溶接技能試験合格者の2名であり、この測定結果から技能者と初心者の作業の違いを見出す。

### (2) 作業動作教示装置の製作と評価

多数の小型振動モータを作業者の腕に取り付け、これらのモータの振動パターンにより動作を指示する教示デバイスを構築する。振動モータの制御は、マイクロコンピュータを用いた回路により行う。

(1)により得た技能者と初心者の作業の違いから訓練に必要な教示パターンに対する振動モータの作動パターンを考案する。それが直感的に教示パターンを想像できるかを、被験者8名を使ったアンケート調査により評価する。

### (3) 動作教示を行うシミュレータの評価

(1)により製作した身体動作および筋活動の測定器と、(2)により製作した作業動作教示装置を既存の溶接訓練用シミュレータに組み込む。これによりシミュレータは、作業者の身体動作および筋活動の状態を取得し、技能者のそれと同じになるように作業動作教示装置で指示を行う。これを用いた訓練を被験者に対して実施し、その訓練効果を評価

する。被験者は4名の訓練の前後に技能レベル評価を行い、その変化を訓練効果とする。なお技能レベルは、実際に溶接作業を行ったときの接合部の形状を三次元形状測定器で測定し、技能検定試験での合否判定指針をもとに、定量的に評価する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 溶接中の腕の動き

###### ① 構築した測定装置

身体動作および筋活動の測定装置を作業者が装着した様子を図2に示す。



(a) 右側面 (b) 正面

図2 身体動作および筋活動の測定装置

肩および肘の関節角度を測定するモーションセンサには、シェイプテープ S1280-96NL (Measurand Inc.) を用いる。これは、32個の曲げセンサが内蔵された960×20mm厚さ2mmの帯状の測定器である。各センサの出力からセンサ全体の曲げの状態を計算することで、センサの長手方向に対し12mm毎の点の3次元位置を取得することができる。図3に示すようにシェイプテープの通信ボックスを背中に固定し、帯部は上腕と手首の2か所で固定する。なお、シェイプテープの座標系は通信ボックスを原点とする。

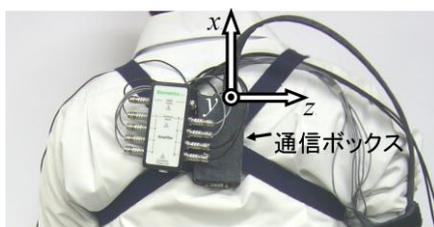


図3 作業者の背面の様子

シェイプテープを固定した箇所（背中・腕・手首）の座標をもとに、腕の関節角度を求める。関節角度の測定では、作業者の腕を図4のように7自由度の多関節アームと仮定して考える。そして、座標系の原点、すなわちモーションセンサの通信ボックスに対する各関節の位置、および関節間の距離をあらかじめ把握しておくことで、三次元座標の軌跡を元に各関節の角度を求めることができる。

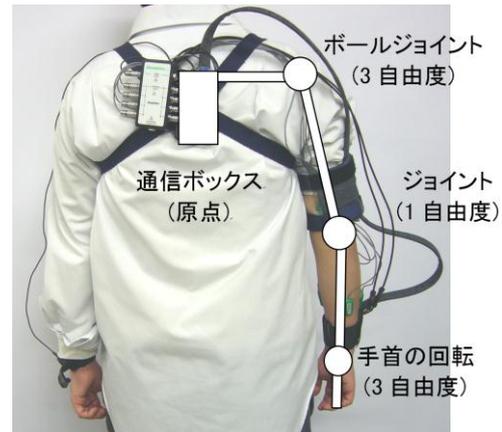


図4 装着者の腕の関節モデル

手首の関節角度の測定には図5に示すフレキシブルゴニオメータ SG65 (Biometrics Ltd.) を使う。これの一端をモーションセンサの先端に、もう一端を作業者の中指中手骨に沿うように取り付ける。これは2軸の曲げセンサで、曲げセンサの角度に比例した電圧を出力することで尺屈・橈屈方向、屈曲・伸展方向の角度を測定することができる。

モーションセンサ先端側に取り付けたゴニオメータの一端は、図のようにシェイプテープと共にリストバンドで固定されている。また、ゴニオメータの一端は、作業者の手の甲に貼り付ける。

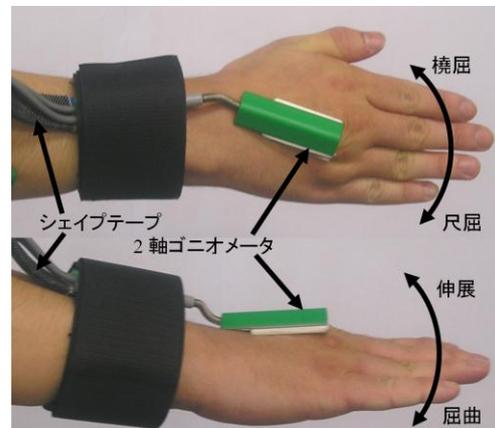


図5 フレキシブルゴニオメータ

溶接の作業中に発生する電氣的ノイズの影響を減らすため、筋活動を測定する表面筋電位計には、電極とアンプが一体化したアクティブ電極 SX230-1000 (Biometrics Ltd.) を使用する。この筋電位を、専用アンプでさらに増幅し、A/D変換器によりデータをPCに取り込む。なお、電極を筋肉に貼りつける際、通電性を高めるために市販のEMS用ジェルを電極に塗り図6のように両面テープで測定する筋肉に貼りつける。



図6 アクティブ電極を貼りつけた様子

② 測定結果

関節角度および筋活動の測定例を図7, 図8に示す. 図7中の角度 a, b, c は, 肘角度 (最伸展時を 180° とする), xy 面に投影した上腕と x 軸とのなす角, xz 面に投影した上腕と x 軸とのなす角である. 技能者の作業では, a=20~40°, b=0~-20°, c=-20~-40° の範囲にあり, 上腕の力を入れず, 前腕の力を常に入れた状態となっている傾向にあった.

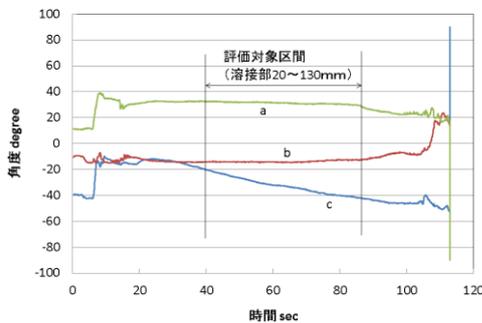


図7 関節角度の測定例 (技能者)

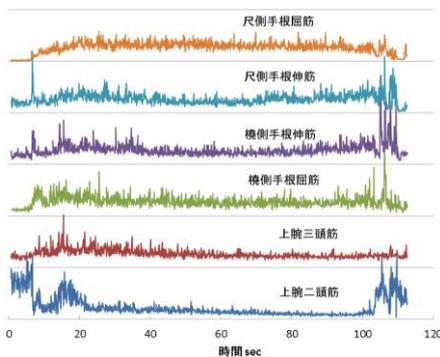


図8 筋活動の測定例 (技能者)

(2) 振動による動作教示装置

① 構築した装置

本教示機能は, 8本の振動モータ房とモータ制御回路で構成されている. 振動モータ房は, 図9に示すように布製のものであり, ここに図10に示す4個の小型振動モータ ( $\phi 12 \text{ t}3.4$ ) が直列に内蔵されている. 振動モータが腕に対して軸方向 20mm 間隔に4個, 周方向 90° 間隔に配置されるように, 前腕部に4本, 上腕部に4本の振動モータ房を作業者に装着させる. 装置を装着した様子を図11に示す.



図9 振動モータ房

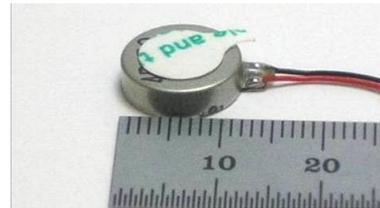


図10 小型振動モータ

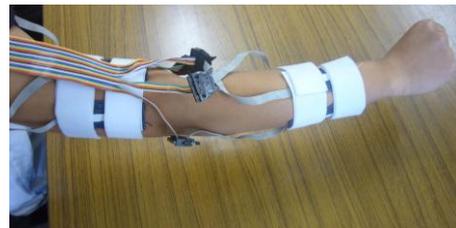


図11 動作教示装置を装着した様子

32個の振動モータの制御は, 図12に示すマイクロコンピュータを用いた回路により行う. この回路は通信回路部と2個の制御回路部に分かれている. 通信回路部はUSBによりPCと接続し, PCと制御回路部間のモータ制御信号を仲介する. 制御回路部は16個のモータを独立にPWM制御することができる.

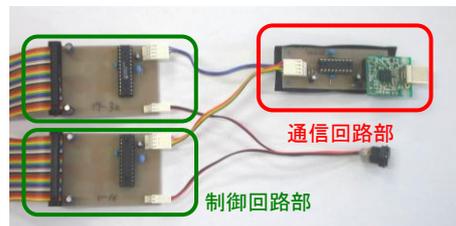


図12 モータ制御回路

② 振動パターンの検討

考案した40種類の振動パターンに対して, 最も多くの被験者が連想した腕の動きとその割合を表1に示す. 振動パターンにおいて「1,2→3,4」という表記は, 図13に示す1番と2番のモータを振動させた後, 3番と4番のモータを振動させ1番と2番を停止させるという意味である. シミュレータで教示を

行う振動パターンはこれらを使用するが、表に示すように最も高い割合であっても正確に動きを指示できないとはいえないものであったため、あらかじめ振動パターンに対応する腕の動きは教えておくこととした。なお、前腕と上腕に力を入れる（抜く）に対応する振動パターンは発見できなかった。そのため、連想できる動きが分らないという割合が多かった振動パターンをこれらに割り当てた。

振動パターン	腕の動き	割合(%)
12, 21→11, 22→ 10, 23→9, 24	肘屈曲	38
9, 24→10, 23→ 11, 22→12, 21	肘伸展	50
29, 30, 31, 32→ 25, 26, 27, 28→ 21, 22, 23, 24→ 17, 18, 19, 20	肩外旋	63
17, 18, 19, 20→ 21, 22, 23, 24→ 25, 26, 27, 28→ 29, 30, 31, 32	肩内旋	75
21→22→23→24	肩屈曲	50
29→30→31→32	肩伸展	38

表1 振動パターンと連想した腕の動き



図13 振動モータの番号

(3) 動作教示を行う溶接訓練用シミュレータ

① 構築したシミュレータ

本研究で用いる被覆アーク溶接訓練用シミュレータは、図14に示すものであり、申請者がすでに開発している。シミュレータ訓練における訓練者はヘッドマウントディスプレイ上にCGで立体表示される仮想溶接母材など作業の様子を観察し、ヘッドフォンにより作業音を聞きながら、実物を模したコントローラを操作することで溶接作業を擬似的に訓練することができる。HMDと両コントローラの位置測定は、CCDカメラで床面等に張付けたマーカを撮影した画像からARToolKitを用いて計算している。なお、ヘ

ッドフォンにはあらかじめ録音した実際の音を作業状況に応じて再生することで、高い臨場感を作業者に与える。シミュレータ訓練の様子を図15に示す。

シミュレータに対して、モーションセンサ、表面筋電位計、振動モータを追加する。教示機能において、逐次モーションセンサと表面筋電位計により被訓練者を監視する。技能者のデータと比較して、間接角度の範囲を超えたものになった場合、それを修正する方向に振動モータにより指示を行う。

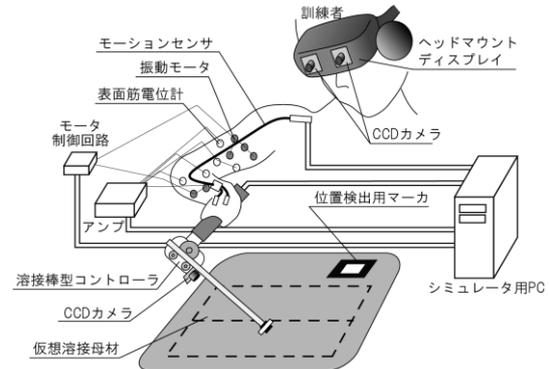


図14 構築した溶接訓練用シミュレータ



図15 シミュレータ訓練の様子

① 訓練効果の検討

訓練効果は溶接部形状の測定は、図16のような形状測定器により行った。溶接母材をxyテーブル上に置き、上からレーザ変位センサでz方向（高さ）を測定する。測定例を図17に示す。

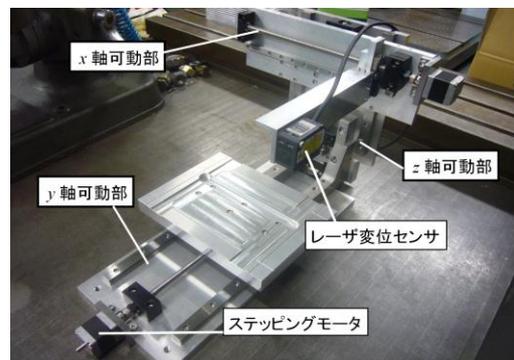


図16 溶接部形状測定器

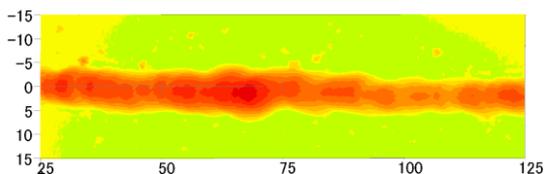


図 1 7 溶接部形状の測定例

このデータから溶接方向の位置に対する溶接部の高さと幅を求め、平均値をまとめたものを図 1 8, 1 9 に示す. 図中の I マークは、高さもしくは幅の標準偏差を示している. 被験者 A, B は、本教示機能の付いていない従来のシミュレータにより訓練し、被験者 C, D は、新たに構築した本教示機能の付いているシミュレータにより訓練している. 溶接部は高さが 3mm, 幅が 13mm, となるのが良いとされていることから、被験者 C, D の方が訓練前後の作業が被験者 A, B よりも改善されていることがわかる.

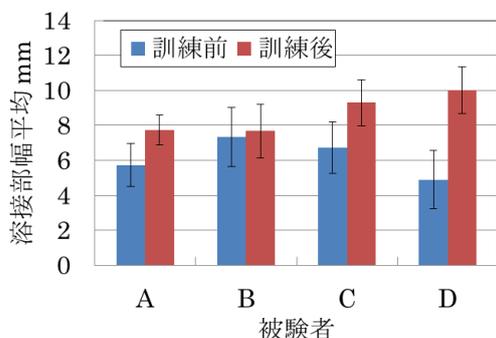


図 1 8 実作業における溶接部の幅

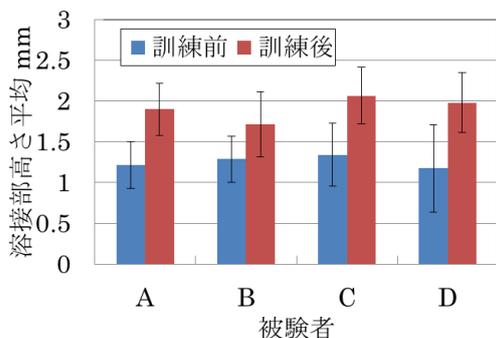


図 1 9 実作業における溶接部の高さ

以上の結果は、技能の違いにおける溶接作業の動作および筋活動の解析結果に対して、振動モータを利用した教示装置を用いることにより訓練用シミュレータの効果を向上させることを示している. この手法は、他の分野においても同様の効果が期待できるものであり、シミュレータによる訓練の発展につながるものと考えられる.

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 橋本宣慶, 溶接作業者の腕の動作と筋活動の測定, 日本人間工学会 関東支部第 40 回大会, 2010/12/4, 東海大学

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

橋本 宣慶 (HASHIMOTO NOBUYOSHI)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号: 00433699