

令和 4 年 6 月 30 日現在

機関番号：82727

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K01068

研究課題名（和文）身体性認知科学に基づくものづくり技能の形式知化と技能評価の革新

研究課題名（英文）Formalization of manufacturing skills and innovation of evaluation methods for the skill level based on embodied cognitive science.

研究代表者

不破 輝彦（FUWA, Teruhiko）

独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校（能力開発院、基盤整備センター）・能力開発院・教授

研究者番号：70219137

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：身体性認知科学に基づき、ものづくり技能の形式知化と、革新的な技能レベルの評価方法の提案を試みた。形式知化においては、フライス加工時の作業者の作業分析および三次元動作分析から、熟練者の動作特徴、すなわち次工程を意識した行動等を明らかにした。技能評価においては、フライス加工とはんだ付け技能を対象に、作業時の脳活動と自律神経活動から、作業難易度に対する生体情報の反応が技能レベルで異なることを示した。生体情報を用いることで、技能評価を革新できる可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フライス加工を作業工程分析した結果から、ものづくり作業における知的管理系技能に潜む暗黙知の形式知化に対して作業工程分析手法が有効であることを示した。今後の教育訓練方法に新たな示唆を与えた点で、教育工学や技能科学における学術的意義、および、教育訓練効率化への還元という社会的意義がある。

フライス加工およびはんだ付けの生体情報計測から、ものづくり作業の技能レベルを神経系反応を用いて定量的に評価できる可能性を示した。これは、従来の評価方法（製作物の出来栄や作業時間で評価）を革新できる学術的意義がある。技能を“技に関する人間の能力”と考え、生体情報を用いる本手法は、より直接的で合理的である。

研究成果の概要（英文）： We tried to formalize the manufacturing skills and propose the innovative evaluation methods for the skill level based on embodied cognitive science.

The motion characteristics of the expert during milling operation were clarified from the work analysis and the 3D motion analysis for the formalization. It was found that experts performed the preparatory work before next process.

Workers' nervous system activities, that is, the brain activity (NIRS) and the autonomic nervous system activity (LF/HF) were measured during milling operation and soldering for the evaluation of the manufacturing skill levels. There was a certain relationship between workers' skill levels, difficulty level of the tasks and nervous system activities. There is a possibility that changes in nervous system activities can evaluate the workers' skill level quantitatively.

研究分野：人間情報学、技能科学、生体情報工学

キーワード：技能評価 生体信号 脳機能 フライス加工作業 はんだ付け作業 熟練者 暗黙知 三次元動作解析

1. 研究開始当初の背景

(1) 効率的な技能伝承は困難

技能とは、技に関する人間の能力であり、技術とは、技に関して図面や文章などに置き換えられたものである^[1]。技能を習得するには長い経験が必要で、人から人へ伝承しなければならない。技能には、暗黙知の側面がある。熟練者は無意識に高度な技能を発揮できるが、なぜそれができるのかをうまく説明できないため、効率的な技能伝承は難しい。

(2) 技能の形式知化が必要

短期間の技能習得のためには、技能を形式知化する必要がある。近年、ものづくり技能を対象として、人間科学の手法を用いて形式知化を目指す研究が見られるようになってきた。例えば、近赤外分光脳イメージング装置 (NIRS) を用いた旋盤加工作業時の脳賦活反応の計測^[2]や、アイマークレコーダを用いてマイクロメータによる寸法測定作業中の注視点計測^[3]などがある。これらに対して、我々は、身体性認知科学の視点で技能習得過程の解明や技能評価を試みる。この視点では、身体・脳・環境(外界)が相互に関連して人は行動すると考える。そのためには、作業者の視線や身体動作、脳・神経活動を総合的に捉える必要がある。このような視点で行われた研究は従来にはない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、身体性認知科学の視点に基づいて、技能、とくに“ものづくり技能”について、人間科学的計測評価による形式知化を行い、技能の習得過程を定量的に評価する新しい基準を導き出すことである。特定のものづくり技能に限定せずに、得られた成果を一般化することにより、技能習得や技能評価の領域を革新することを目指す。

3. 研究の方法

(1) 概要

本研究で対象としたものづくり技能は、フライス加工技能と電子機器組立て技能である。被験者として熟練者(技能検定1級所持者または相当)と中級者(職業能力開発総合大学校総合課程学生)を用いて、ものづくり作業中の被験者に対して各種の計測を行った。作業の難易度として、低難度の作業と高難度の作業を用意した。被験者の技能レベル、作業の難易度、計測結果を総合的に分析して、技能の形式知化、技能レベルの定量的評価を行った。

以下、各技能を対象にした実験について、具体的な方法を述べる。

(2) フライス加工技能

作業内容は、汎用立てフライス盤によるエンドミル加工(直溝、U溝)である。それぞれ荒加工と中・仕上げ加工に大別される。計測上の制約から、計測項目に応じて同じ作業を2回(以下の、)実施した。

神経系の計測

被験者として熟練者5名、中級者10名を用いた。作業時の脳・神経活動を捉えることを目的として、前頭前野の脳血流量変化(キッセイコムテック製HEGセンサ、計測位置は国際10-20法のFP1)および心電図を計測した。HEGセンサにより得られるHEG値が大きいくほど、前頭前野の脳賦活度が高い。例えば作業手順の計画や思考、計算を行うと、HEG値は大きくなる。心電図からは、心拍変動による自律神経バランス評価の指標として用いられるLF/HFを算出した。LF/HFが大きいくほど自律神経バランスが交感神経側であることを示し、より緊張度が高かったり、より活動的であったりすることを意味する。

作業を6区分(安静(作業前)、直溝荒加工、U溝荒加工、直溝中・仕上げ加工、U溝中・仕上げ加工、安静(作業後))に分けた。さらに、このうち2つの荒加工を「低難度」、2つの中・仕上げ加工を「高難度」と位置づけた。難易度の観点は、作業の工程数、および、精神的負荷の大きさである。作業区分ごとにHEG値、LF/HFの平均を求めた。

実験回数は、各被験者1回ずつとした。なお計測値に欠損があったりHEG値が負になったりした場合には、外れ値としてデータを除外する。

三次元動作分析、作業工程分析

被験者として熟練者4名、中級者1名(学生)を用いた。作業者の三次元動作を捉えることを目的として、光学式モーションキャプチャシステム(ナックイメージテクノロジー、MAC3Dsystem)で動作を計測した。作業工程を分析するために、被験者の行動をビデオカメラで撮影し、タスク分析/行動観察ソフトウェア(TEA社、CAPTIV-L2100-M)で分析した。工程分析では、の6区分とは異なり、詳細な手順に合わせた10区分、すなわち、1)ハンドル操作(切削加工)、2)清掃、3)ヤスリがけ、4)移動、5)目盛合わせ・加工条件設定、6)測定、7)測定器の調整、8)静止、9)図

面確認、10)被削材取り付け・取り外し、とした。

上記のエンドミル加工に加えて、鉄工用中目ヤスリによる六面体(荒加工または仕上げ加工を施した一般構造用圧延鋼材 SS400)の面取り課題を実施した。MAC3Dsystem を用いてヤスリ先端部の動きを計測し、ウェーブレット変換により、時間周波数解析を行った。

(3) 電子機器組立て技能

作業内容は、電子機器組立て作業(基板への素子(抵抗、ダイオード、LED)の実装)である。作業手順の複雑さの観点から、低難度作業(例えば、素子の向きを統一する等)と高難度作業(例えば、素子の向きを不規則に指定する等)を設定した。

被験者として熟練者2名、中級者4名を用いた。作業時の脳・神経活動を捉えることを目的として、前頭前野の脳血流量変化(NeU製 WOT-100)および心電図を計測した。WOT-100により得られる酸素化ヘモグロビン量が大きいほど、前頭前野の脳賦活度が大きい。心電図からは、LF/HFを算出した。実験回数は、熟練者、中級者のうち各1名は低難度作業、高難度作業の順序を逆にして2回、他は1回ずつ(低難度作業、高難度作業の順序はランダム)とした。なお、計測値に欠損があったり、作業中の酸素化ヘモグロビン量が負になったりした場合には、データを除外する。

4. 研究成果

(1) フライス加工技能の研究成果

神経系計測の成果

技能の習得過程を形式知化する意味で、従来の技能評価を革新できる可能性を示す結果を得た^[4]。

図1は、安静時(作業前と作業後の平均をベースラインとして補正済み)で正規化したHEG値を示す。これより、以下のことがわかった。

- ・熟練者は中級者より低難度作業時の HEG 値が低い ($p < 0.05$)。
- ・熟練者は低難度作業時より高難度作業時の方が HEG 値が高いが ($p < 0.05$)、中級者では作業難易度の違いが見られなかった。
- ・高難度 / 低難度の比を取ると、熟練者の方が中級者より大きい傾向がみられた。

図2は、安静(作業前)時で正規化したLF/HFを示す。なお中級者1名の心電図計測結果に欠損があったため、外れ値として除外した。結果から以下のことがわかった。

- ・熟練者は中級者より低難度作業時の LF/HF が低い傾向がある。
- ・熟練者は低難度作業時より高難度作業時の方が LF/HF が高いが ($p < 0.05$)、中級者では作業難易度の違いが見られなかった。
- ・高難度 / 低難度の比を取ると、熟練者の方が中級者より大きい ($p < 0.05$)。

この実験では被験者数が少なく、統計的有意差が示されなかった結果もある。しかし HEG 値(中枢神経系)と LF/HF(自律神経系)の傾向は類似しており、難易度の異なる作業に対する熟練者と中級者の神経系反応が異なっている可能性を示す結果である。この結果を応用すれば、作業中の神経系計測データを用いることで、作業者の技能レベルを定量的に評価できる可能性がある。従来の技能評価は、作品の出来栄や作業に要した時間で技能レベルを評価していた。それに対して本手法は、作業中の作業者自身の生体データを用いる点に独創性があり、従来の技能評価を革新できる可能性を持っている。

三次元動作分析、作業工程分析の成果

熟練者と中級者の行動、動作を比較することにより、これまで暗黙知として不明確だった

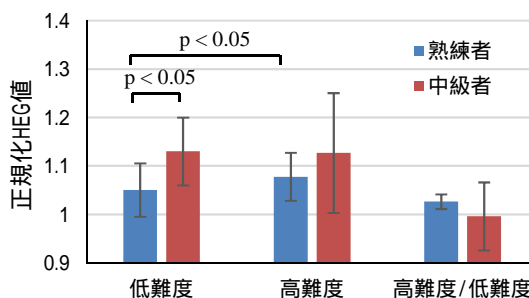


図1 安静時で正規化したHEG値(補正後)の比較(熟練者:n=5、中級者:n=10)

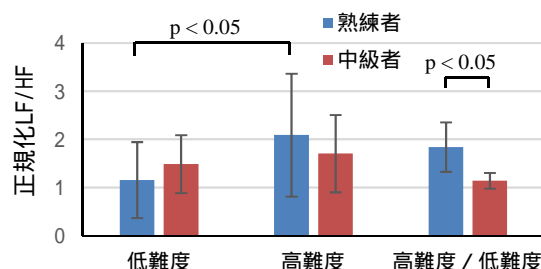


図2 安静(作業前)時で正規化したLF/HFの比較(熟練者:n=5、中級者:n=9)

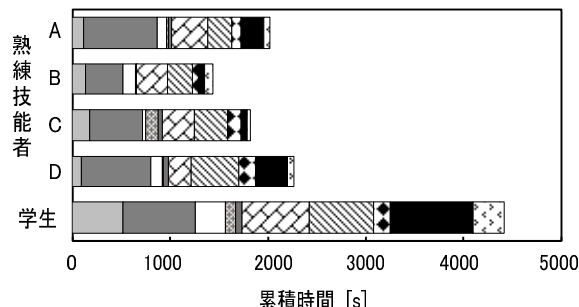
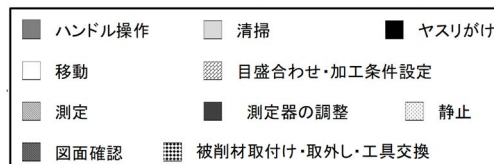


図3 溝加工作業の仕上げ作業における要素作業の累積時間

た部分が明確になり、熟練者の動作特徴を形式知化できた^[5]。

作業工程分析では、作業全体を俯瞰して検討した。熟練者の工程や動きを記録して形式知化することで、中級者の作業の無駄を明確にできる。中級者は、基礎技能を習得して作業能率の向上が優先される段階にあるため、このような作業分析が有効である。

以下は、詳細な分析結果である。溝加工作業の荒加工の工程を見ると、熟練者は清掃だけでなく、平行台とパイソ口金との密着具合を確認し、必要に応じて白砥石を用いてパイソ面を整える作業が見受けられた。図3は、溝加工作業の仕上げ加工における要素作業の累積時間を示す。作業工程数は、熟練者は中級者より少なく、特に測定作業の回数と静止時間に違いが見られた。仕上げ加工時のテーブル自動送り中において、中級者は加工全般において切削部を静止して注視していたが、熟練者は工具のくいつきでは切削部を注視し、切削が安定した時点から作業台に移動し、次工程に使用する工具や測定器を準備していた。

三次元動作分析による面取り課題では、ヤスリ先端軌道の周期性について、技能レベルで異なる特徴が明確になった。図4は、ヤスリ先端軌道の周期性を比較したものである。荒加工において、熟練者は、作業開始直後に、作業中よりも高い周波数が見られ、作業中の先端の揺れは中級者より大きかった。この動きを映像で確認すると、作業開始直後にヤスリを用いて加工で生じた大きなバリに対して折り目をつけて整える動作を行い、加工中は、ヤスリの方向や速度を変えて、ヤスリによるかえりを取り除いていた。これは中級者には見られない動きであり、荒加工の面取り作業の目的を理解した熟練者の行動であるといえる。仕上げ加工では、ヤスリ面全体を使って1回の動作で稜線のヤスリがけを行っていた。これは、面取り幅を均一とし、ヤスリによるかえりを少なくするための行動といえる。

(2) 電子機器組立て技能：神経系計測の研究成果

普遍的な技能評価を実現するためには、フライス加工以外の技能においても同様な特性が得られるかどうか、検証する必要がある。そこで電子機器組立て技能を対象に、神経系計測から技能レベルを定量的に評価できるか検証し、以下の成果を得た。

図5は、作業中の酸素化ヘモグロビン量について作業者の技能レベル、作業難易度で比較した結果である。なお、熟練者1名(実験回数1回)の作業中の酸素化ヘモグロビン量が負の値となったため、外れ値として除外した。今回の結果からは、熟練者は低難度作業時より高難度作業時の方が酸素化ヘモグロビン量が高く、中級者では作業難易度の違いが見られなかった。低難度作業時は、熟練者の方が酸素化ヘモグロビン量が低かった。これらはフライス加工作業の結果から得られたHEG値の傾向と同じであった。

図6は、作業中のLF/HFについて作業者の技能レベル、作業難易度で比較した結果である。今回の結果からは、熟練者は低難度作業時より高難度作業時の方がLF/HFが高く、中級者は作業難易度の違いが見られなかった。これは酸素化ヘモグロビン量の場合と同傾向である。一方、高難度作業時は熟練者の方がLF/HFが高く、酸素化ヘモグロビン量の場合とは異なる傾向であった。

上記の結果については、被験者数が少なく、確証はない。熟練者の被験者数については、本研究期間の後半がコロナ禍と重なり、外部の熟練者を被験者として招へいすることができなかったことが主因である。今後、被験者数を増やして検証を重ねていく必要がある。

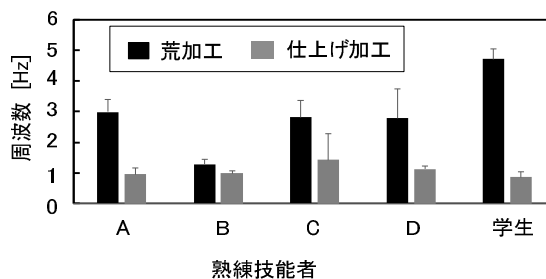


図4 面取り課題のヤスリ先端軌道の周期性の比較

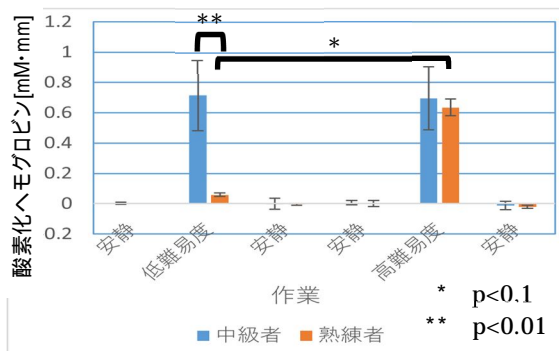


図5 電子機器組立て作業時の酸素化ヘモグロビン量の比較(熟練者:n=2、中級者:n=5)

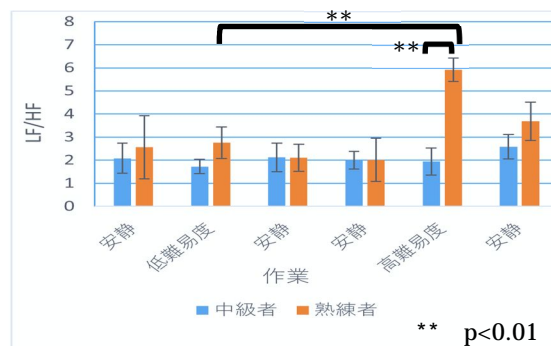


図6 電子機器組立て作業時のLF/HFの比較(熟練者:n=3、中級者:n=5)

<引用文献>

- [1] PTU 技能科学研究会、技能科学によるものづくり現場の技能・技術伝承、日科技連、p.14、2019
- [2] 侯磊、綿貫啓一、NIRS を用いた旋盤加工作業時における脳賦活反応計測、日本機械学会論文集（C 編） 79 巻、800 号、pp.1124-1133、2013
- [3] 武雄靖、夏恒、技能伝承のためのマイクロメータによる寸法測定作業中の注視点移動に関する実験的検討、日本機械学会論文集（C 編） 79 巻、799 号、pp.814-826、2013
- [4] 不破輝彦、本田寛亨、大友勇人、二宮敬一、池田知純、貴志浩久、神経系活動に基づくフライス加工技能レベルの新しい定量的評価法、技能科学研究、38 巻、4 号、pp.11-15、2022
- [5] 池田知純、二宮敬一、新家寿健、不破輝彦、垣本映、岡部眞幸、フライス盤作業における熟練技能者の動作特徴の抽出、工学教育、68 巻、1 号、pp.69-74、2020

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 不破輝彦、本田寛享、大友勇人、二宮敬一、池田知純、貴志浩久	4. 巻 38
2. 論文標題 神経系計測に基づくフライス加工技能レベルの新しい定量的評価法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 技能科学研究（掲載決定）	6. 最初と最後の頁 11-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 池田知純、二宮敬一、新家寿健、不破輝彦、垣本映、岡部眞幸	4. 巻 68
2. 論文標題 フライス盤作業における熟練技能者の動作特徴の抽出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 工学教育	6. 最初と最後の頁 69-74
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大友勇人、貴志浩久、不破輝彦
2. 発表標題 はんだ付け作業中の生体計測に基づく定量的技能評価法の試み
3. 学会等名 LIFE2020-2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大友勇人、貴志浩久、不破輝彦
2. 発表標題 作業者の神経系計測に基づくはんだ付け技能の定量的評価法
3. 学会等名 第29回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 不破輝彦、本田寛享、大友勇人、二宮敬一、和田正毅、岡部眞幸、池田知純、貴志浩久
2. 発表標題 神経系計測を用いた技能レベルの新しい評価方法の提案 フライス加工技能を例に
3. 学会等名 第28回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古賀俊彦、川上曜、大北健二、吉田瞬、二宮敬一
2. 発表標題 フライス盤作業におけるパイスの締付け力の可視化に関する研究
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古閑凜太郎、池田知純、新家寿健、垣本映、二宮敬一、不破輝彦、岡部眞幸
2. 発表標題 フライス盤加工作業における熟練技能者の作業分析
3. 学会等名 2020年度精密工学会春季大会学術講演会第27回学生会員卒業研究発表講演会講演論文集
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下幸祐、中村知徳、貴志浩久、不破輝彦
2. 発表標題 心拍変動による自律神経バランス評価の推定精度と呼吸規則性との関係
3. 学会等名 LIFE2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下幸祐、中村知徳、貴志浩久、不破輝彦
2. 発表標題 心拍変動による自律神経バランス評価のt検定p値と呼吸規則性との関係
3. 学会等名 日本生理人類学会第80回大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下幸祐、中村知徳、貴志浩久、不破輝彦
2. 発表標題 心拍変動による自律神経バランス評価の推定精度と呼吸規則性との関係
3. 学会等名 第27回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古閑凜太郎、池田知純、新家寿健、垣本映、二宮敬一、不破輝彦、岡部眞幸
2. 発表標題 熟練者によるフライス盤加工の作業分析
3. 学会等名 第27回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西垣大紀、葛原黎、近藤芳憲、二宮敬一、和田正毅、岡部眞幸、貴志浩久、池田知純、不破輝彦
2. 発表標題 身体性認知科学に基づくものづくり技能評価の試み
3. 学会等名 日本科学教育学会年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西垣大紀、葛原黎、二宮敬一、和田正毅、岡部眞幸、貴志浩久、池田知純、不破 輝彦
2. 発表標題 ものづくり作業中の神経系活動計測と技能レベルとの関係
3. 学会等名 LIFE2018 (第18回日本生活支援工学会大会, 日本機械学会 福祉工学シンポジウム2018, 第34回ライフサポート学会大会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 不破輝彦
2. 発表標題 身体性認知科学による技能の解明～パート1：考え方と研究事例
3. 学会等名 日本品質管理学会第129回講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 不破輝彦、塚崎英世
2. 発表標題 身体性認知科学による技能の解明
3. 学会等名 第26回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西垣大紀、葛原黎、近藤芳憲、二宮敬一、和田正毅、岡部眞幸、貴志浩久、池田知純、不破 輝彦
2. 発表標題 生体情報に基づいたものづくり技能評価の試み
3. 学会等名 第26回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 不破輝彦、本田 寛享、二宮敬一、和田正毅、岡部眞幸、池田知純、貴志浩久
2. 発表標題 新しい技能評価を目指した作業者の神経系活動推定
3. 学会等名 第25回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 池田知純、二宮敬一、不破輝彦、和田正毅、岡部眞幸、新家寿健、垣本映
2. 発表標題 機械加工作業の技能可視化の一検討
3. 学会等名 第25回職業能力開発研究発表講演会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 PTU技能科学研究会（原圭吾、新目真紀、磯部眞一郎、市川博、塚崎英世、西澤秀喜、平林裕治、不破輝彦、村上智広）	4. 発行年 2019年
2. 出版社 日科技連出版社	5. 総ページ数 176
3. 書名 技能科学によるものづくり現場の技能・技術伝承	

1. 著者名 PTU技能科学研究会（不破輝彦、池田知純、他）	4. 発行年 2018年
2. 出版社 日科技連出版社	5. 総ページ数 152
3. 書名 技能科学入門	

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	和田 正毅 (WADA Masaki) (70648948)	独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基・能力開発院・教授 (82727)	削除：2018年5月10日
研究分担者	岡部 眞幸 (OKABE Masayuki) (20152332)	独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・教授 (82727)	削除：2021年5月28日
研究分担者	二宮 敬一 (NINOMIYA Keiichi) (20726335)	独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・准教授 (82727)	
研究分担者	貴志 浩久 (KISHI Hirohisa) (00747735)	独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・准教授 (82727)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	池田 知純 (IKEDA Tomozumi) (80648923)	独立行政法人高齢・障害・求職者雇用支援機構職業能力開発総合大学校(能力開発院、基盤整備センター)・能力開発院・教授 (82727)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関