ウェアラブルセンサを用いた 熟練指導員のヤスリがけ技能主観評価値の再現

Reproduction of Expert's Subjective Skill-Level Evaluation with Wearable Acceleration and Gyroscope Sensors on Metal-Filing

榎堀 優
Yu Enokibori

名古屋大学 大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science, Nagoya University

enokibori@cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp, <http://www.cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp/~enokibori/>

間瀬 健二
Kenji Mase

(同 上)

mase@nagoya-u.jp, <http://www.cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp/~mase/>

keywords: skill level evaluation, wearable, sensor, skill science, metal filing

Summary

On-demand, skill-level self-checks are required to establish effective training, and this is the same for metal-filing. However, such a training system has not been established yet for metal-filing because the current skill-level check depends on subjective skill-level estimation by experts. Such subjective skill-level estimation is composed of various complex viewpoints, and its estimation mechanisms cannot be represented in language because they are generated and supported by the experience of experts. That is why sensor-based, on-demand systems cannot faithfully imitate or replace the current skill-level checks of metal-filing. To solve this problem, we analyze the relationships among the subjective skill-level estimation mechanisms of experts and metal-filing mechanics structures. Our analysis yielded three simple viewpoints and related measures: class 2 lever-like movement measure (L), upper body rigidity measure (R), and pre-acceleration measure (A). Surveys of experts also yielded another viewpoint and a related measure: stability measure (S). These four measures successfully reproduced the subjective skill-level estimation of experts (adjusted- $R^2 = 0.90, p < 0.1, N = 10$). The coefficients for the measures, which suggest that A is the main factor of the subjective skill-level estimation of experts, also suggest that effective training must emphasize these points in this order: $A > L > R$. S 's coefficient suggests that the skill-level scores of experts are reduced by 69% when the filings of learners fail. In addition, since these four measures can be calculated with three small wearable hybrid sensors, they can be implemented on scalable wearable sensor-based skill-training systems. In future works, we will implement one such system, integrate it into a skill-training center's teaching plan, and assess how much the system improved the learning speeds of the students.

1. はじめに

本論文は、ウェアラブル加速度・角速度センサを用いたヤスリがけ技能分析結果と、その結果を用いて熟練指導員のヤスリがけ技能主観評価値を再現する手法について述べる。ヤスリがけ技能は、図1に示すように、ヤスリを用いて金属塊を削る動作である。金属塊の切削面を平らに削るという条件下で、切削面にかかる力を最大化する動作である。その習熟過程は「作用点にかかる力が最大化するように動作の力学構造を最適化していく」というバッティングやゴルフスイングなどと共通の特徴を持つ。

熟練技能者のヤスリがけは、未だに産業の根幹を支えている。例えば、一品ものである新製品エンジンのプロトタイプは、マザーマシーンから造出された段階でバリや歪みを抱えていることがある。その場合、熟練技能者

が高精度のヤスリがけで修正することで、造出し直しなどの無駄を無くしている。

一方で、熟練技能者は急速に減少している。主な原因は、熟練技能者の引退と若年層の製造業離れである。従って、技能者の効率的な育成が求められているが、ヤスリがけ熟練者の育成は多大な時間を必要とする。例えば、WorldSkills International^{*1}が主催する国際技能競技大会 (WorldSkills Competition: 通称、技能五輪) で幾人もの金メダリストを輩出している技能研修所では、ヤスリがけ技能の指導に数百時間を必要としている。

習熟に長時間を必要とする主な原因は、現在のヤスリがけ技能指導が「指導員の経験や勘といった暗黙的な経験知に基づく主観評価とコーチング」に依存していることである。訓練生は技能改善に向けた工夫をしても、その

^{*1}WorldSkills International: <http://www.worldskills.org/>

図1 ヤスリがけ動作の主な4状態

- A): 基本状態
 B): 体の事前加速が終了, ヤスリが前方移動を開始, 切削開始
 C): 体・ヤスリ共に前方移動が終了, 切削終了
 D): ヤスリを持ち上げつつ体が後方移動し, A に戻る

成否を指導員が観察して言語化するまで判断できず, 次の段階に進めない状況や習熟と逆方向へ努力し続ける状況がたびたび発生している. 加えて, 指導員が訓練生の工夫を見逃して成否評価をしないことや, 複数の指導員が異なる主観評価やコーチングを行うことも珍しくなく, 技能習熟速度の鈍化の一因となっている.

一般的な技能習得と同様に, ヤスリがけにおいても, 効率的な技能習得には訓練生自身が自己の状況を均質の指標で随時確認できる環境が必要である. その実現には, 指導員らの経験や勘といった暗黙的な経験知に基づく主観評価値を, センサなどを用いて再現するシステムの実現が必要であるが, ヤスリがけにおいて, これは未だなされていない. ヤスリがけにおける指導員らの主観評価は, 各々の経験に基づき多種多様な評価軸があり, 直接的に再現することは現実的ではない. 例えば, 5名の熟練指導員が同意して言語化できた評価軸だけでも9項目となった(表1). また, 項目4や項目6のように画像処理やモーションキャプチャ, 敷設型の赤外線センサなどの大がかりな機材が無ければ観測しづらい評価軸もあり, 多数の訓練生が同時に利用する主観評価値再現システムの構築に不向きである. さらに, 表1のように言語化できたとしても, どのような評価値を訓練生に割り当てるかは, 依然として指導員の経験や勘に基づいており, それらの暗黙的な経験知とセンサなどで計測できる物理量との関係を明らかにする必要がある.

そこで我々は, 熟練指導員らへのヒアリングから得られた形式知としての評価軸を直接利用せず, 指導員らの

表1 熟練指導員の主観評価項目

- 1) 体重のかけ方: 上半身の沈み込み
- 2) 体重のかけ方: 前足の踏み込み
- 3) 手首を胸に近づけて体で押しているか
- 4) ヤスリと腕が直線状にあるか
- 5) ヤスリの上に顔があるか
- 6) パイス台のハンドルと左足のつま先位置の合致
- 7) 右膝 腰 上半身 ヤスリ順の滑らかな動き
- 8) 体の軸の傾き(前傾姿勢)
- 9) ヤスリの先端から根本まで利用した切削

主観評価を「ヤスリがけ動作の基礎要素を複合的に判断したもの」として捉え, 基礎要素から導出した評価尺度を用いて指導員らの総合的な主観評価値を再現することを目指し, これに成功した.

本研究では, ヤスリがけ動作の構造を「作用点にかかる力を最大化する力学構造」として捉え, 簡素な力学構造の当て嵌めから3つの基礎要素を導出し, 各要素から評価尺度を構築した. また, その妥当性を元技能五輪選手の熟練指導員らと訓練生らのセンサデータ比較により確認した. 加えて, 熟練指導員へのヒアリングから安定性尺度を追加導入し, 合計4つの評価尺度と表1に示した熟練指導員による主観評価(9項目各2点18点満点10名分)との間に, 修正 $R^2 = 0.90$ ($p < 0.1$) の高い相関性を確認した.

なお, 提案尺度の導出に簡素な力学構造を用いたのは, 再利用性が高い比較的廉価な小型のウェアラブル加速度・角速度センサのみで計測可能とするためである. これにより, 設置型の設備が不要となり, 多数の訓練生が同時に利用できる主観評価値再現システムを実現できる. 加えて, 指導時の言語化が容易であるという利点も得た.

以下, 本論文は2章で関連研究について述べ, 3章でヤスリがけ動作と取得したセンサデータについて概説する. 4章は本研究で策定した評価尺度を説明する. 5章で熟練指導員の主観評価と提案尺度の関連性分析と評価値再現に付いて述べ, 6章でまとめる.

2. 関連研究

各種技能の身体動作分析や, 熟練者と学習途上者の身体動作比較は, 芸術, ヘルスケア, スポーツといった多岐にわたる分野で研究されている.

Yamamoto ら [Yamamoto 08] はモーションキャプチャを用いて陶芸における練りの動作について分析している. Matsumura ら [Matsumura 11] や Kawakami ら [Kawakami 08] はサンバにおけるリズム感と身体部位ごとの動作の関係について分析している. Jafari ら [Jafari 07] はヘルスケアの分野における人体動作計測を加速度センサで行っている. スポーツ分野では, ウェアラブルセンサを用いた技能分析が特に盛んである [Murata 01, Theobalt 04, Komura

02, Lapinski 09, Ghasemzadeh 09, Heinz 06, Spelmezan 09] .

スポーツ分野では熟練者と学習途上者を区分する研究も活発である．Ghasemzadeh ら [Ghasemzadeh 11] は 3 軸加速度センサ及び 2 軸ジャイロスコプを用いて、野球のスイング動作について技能レベルを評価している．Ahmadi ら [Ahmadi 09] は人体にジャイロスコプとマークを取り付け、テニスのサーブの技能レベルを評価している．Ahmadi らは、腕や肩の回転、ラケットのヘッドスピードなどを総合的に評価し、4 名の異なる技能レベルのプレイヤーの切り分けに成功している．Bächlin ら [Bächlin 11] は、手首、背骨上部、背骨下部に加速度センサを取り付け、熟練者 7 名・中級者 8 名・初級者 3 名の水泳の技能レベルを評価している．Robinson ら [Robinson 11] は加速度センサによりカヤックの技能レベルを評価している．その結果、オリンピックレベルのコーチが発見できなかったパドリングの評価ポイントを導出している．

ウェアラブルセンサを用いて技能レベルを数値化し、熟練者の主観評価を再現する研究としては、Harding ら [Harding 07, Harding 08a, Harding 08b] の研究が上げられる．Harding らは慣性センサ及び 3 軸加速度センサを腰に装着し、スノーボーダーの技能レベルを評価している．この評価結果は熟練審判による評価と強い相関を示した．また、Harding らは 16 名の国際級熟練審判にインタビューを行い、新たな評価尺度の作成も試みている．

上記の様に芸術やヘルスケア、スポーツといった幅広い分野において技能分析が行われており、スポーツ分野ではウェアラブルセンサを用いた技能レベルの切り分けや数値化、熟練者の主観評価の再現も試みられている．ヤスリがけについては、Kojima ら [Kojima 09] が多視点のカメラ画像とウェアラブル加速度センサを用いて、ピーク値の出現タイミングの観点から技能を分析している．しかし、ヤスリがけの体全体の動きに対する分析が不足しており、加えて、導出した分析結果と技能レベル間の関係性分析、技能レベルの数値化、導出した数値と熟練者の主観評価値との関係性分析は行われていない．本研究では、ヤスリがけにおける体全体の動きに対する分析を行い、その結果と技能レベル間の関係性を明らかにして、熟練者の主観評価値を再現することに成功した．

3. ヤスリがけ動作とセンサデータ

本節では、基礎知識の共有を目的にヤスリがけ動作の概要を説明する．加えて、本研究で用いたセンサデータの詳細について述べる．

3.1 ヤスリがけ動作の概要

ヤスリがけ動作を主な 4 つの状態に分け、図 1 に示す．技能者は、まず初期状態 A から体を前方へ事前加速して切削で消費するエネルギーを貯める．この時、ヤスリは

図 2 ハイブリッドセンサ WAA010 と装着箇所

表 2 WAA010 のセンサ性能とサンプリング設定

	加速度センサ	ジャイロセンサ
軸数 / 電池寿命	3 軸 / 約 6 時間	
通信プロトコル	Bluetooth Ver. 2.0 + EDR	
通信可能距離	10 m	
最大サンプリングレート	1000 Hz	1000 Hz
最大検出範囲	$\pm 2 \text{ G to } \pm 16 \text{ G}$	$\pm 2000 \text{ deg/s}$
本研究で用いたサンプリング設定		
サンプリングレート	100 Hz	100 Hz
最大検出範囲	$\pm 8 \text{ G}$	$\pm 2000 \text{ deg/s}$

地磁気センサは本研究で利用していないため記載を省略した．

殆ど動いていない．体が十分に加速しつつ前傾し、ヤスリ後方を支える腕の肘 (図 1 の場合は右肘) が十分に締まって固定されると、ヤスリへ力を効率よく伝えられる図 1 の B の姿勢となる．この図 1 の B の時点からヤスリの前方移動が始まり、ヤスリの先端から根本までを使って切削する．その後、図 1 の C の状態で切削が終了する．切削が終了した後、図 1 の D のようにヤスリを持ち上げて金属面との接触を断ちつつ、体とヤスリを後方移動して、図 1 の A の状態へ戻る．以降、これを繰り返す．

3.2 センサデータの収集と事後処理

本研究では WAA010^{*2}を頭、腰、ヤスリ後方を支える腕の手首 (以後、頭、腰、手首のセンサと呼称する) に装着して加速度データ及び角速度データを取得した．図 2 にセンサの外観と装着箇所を示す．表 2 にセンサ性能とデータ取得時のサンプリング設定を示す．4 名の熟練指導員と 10 名の訓練生からヤスリがけ開始 10 秒後から切削 30 回分のデータを収集した．被験者は全て男性である．取得したデータに最大検出範囲を超えた箇所は存在しなかった．取得したデータは 11 点単純移動平均で平滑化し、角速度を積算した値を用いて加速度をセンサ座標系から世界座標系に変換した．変換後の軸を図 2 に示す．加えて、変換後の加速度を積算して各部位の速度データを導出した．なお、ヤスリがけ動作の前後に 5 秒間の静止時

^{*2}ATR-Promotions 小型無線ハイブリッドセンサ II(WAA010): <http://www.atr-p.com/sensor10.html>

図3 待機状態から切削終了までの力学構造
(A から C は図1のA から C に対応する)

間を設け、前後の静止時間における積算加速度及び積算角速度が0になるように誤差とドリフト値を排除した。

4. ヤスリがけ動作の評価尺度

本研究では、ヤスリがけ動作の構造を「作用点にかかる力を最大化する力学構造」として捉え、図3に示す簡素な力学構造の当て嵌めから3つの基礎要素を導出した。加えて、指導員らへのヒアリングから安定性尺度を導入し、計4つの評価尺度を用いた。本節では、各評価尺度の詳細とその妥当性について述べる。

各尺度の説明に先立ち、共通して用いる図表として図3と図4を概説する。図3は、図1のAからCの動作の力学構造^{*3}である。図4は熟練指導員と訓練生の典型的な一回の切削をX軸方向速度についてグラフ化したものである。グラフ化に利用した熟練指導員と訓練生は、熟練指導員による主観評価の降順で、それぞれ4名中2番手と10名中5番手の被験者である。各被験者の30回の切削中から、目視で差が明確である切削を選択した。

以後、本稿ではX軸方向の速度のみを扱う。速度と表記する場合、明記がない限り各部位のX軸方向の速度を指すものとする。なお、各尺度の詳細な計算式は付録に譲る。

4.1 第2種槌子状動作尺度(L)

我々は、ヤスリがけ動作を図3に示すように、後方の足を回転支点(HingeSupport)とした第2種槌子状の構造で近似した。この構造は、上体に蓄えられたエネルギーを作用点であるヤスリの切削面で増幅し、効率的な切削を可能とする。

実際のヤスリがけ動作が第2種槌子状構造で動作していることは、図4に示したb時点における熟練指導員の頭と腰の速度比から裏付けられた。物体が円運動をする場合、各部の速度比は中心点からの距離の比と同じになる。熟練指導員の頭部速度が最高となったときの頭と腰

図4 熟練指導員と訓練生の各部位の速度

縦線 a: 頭の速度の負から正へのゼロクロス。図3のA。
縦線 b: 頭の速度の最高値。図3のB。
縦線 c: 手首の速度の最高値。図3のBとCの間。
縦線 d: 頭の速度の正から負へのゼロクロス。図3のC。

の速度比は熟練指導員4名の平均で 1.64 ± 0.22 対1であり、身長と腰高の比である 1.67 ± 0.05 対1と近い値を取った。これは熟練指導員のヤスリがけ動作は、後ろ足から頭頂部にかけての動作が後ろ足を回転支点とした第2種槌子状動作であることを裏付けている。

一方で、訓練生10名のb時点での頭と腰の速度比は平均で 1.23 ± 0.26 であり、経済産業省による人間特性基盤整備事業(size-JPN)2004-2006^{*4}による20歳台から40歳台の日本人の平均身長と平均腰高^{*5}の比である約1.7対1より低く、第2種槌子状動作が行えていないことが分かる。

従って、第2種槌子状動作を行えているかどうかは、ヤスリがけ動作の習熟度合いの目安とできる。本研究では、これを第2種槌子状動作尺度(L(Class 2 Lever like

^{*4}size-JPN 2004-2006;

<http://www.meti.go.jp/press/20071001007/20071001007.html>

^{*5}size-JPN 2004-2006 には腰高のデータが無いので肘頭高-3cmで代用した。肘頭高は「床面から直角に曲げた肘の骨の下端までの鉛直距離」であり、センサ装着部である腰より幾ばくか高い。そこで3cmを腰と肘頭高の概算距離として差し引いた。

^{*3}熟練指導員からのコメント「図1のBからCへ移行する切削時は、前方の脚(図3では左足)に体重を掛けないことがコツ。極端に言えば前方の足は浮いていても良い」を考慮し、前方の足はヤスリがけ動作と無関係としている。

Movement Measure)) とした。

4.2 上体剛体化尺度 (R)

技能者が効率よく金属面を削るためには、力が全てヤスリ面へ作用すること、つまり、図3のBに示すように、支点とヤスリ面との間にある人体及びヤスリが自由度を失って一塊の剛体のように振る舞い、力を他に逃がさない状態が必要だと推測される。以下、本稿では、本来は可変である人体を、筋力で支えたり関節可動域の制限で固定したりすることで、あたかも剛体のように作用させることを剛体化と呼ぶ。

熟練指導員の切削において、上体の剛体化が行われていることは、図4に示した頭と手首の速度から裏付けられる。図4の熟練指導員のグラフでは、手首の最高速度点(縦線c)から切削終了点(縦線d)の間において、頭と手首の速度が近い値を取り、同期して動いている。これは上体が一塊となって動いていることを示す。一方、訓練生のグラフは、頭の速度が先に減速している。これは体の動きが先に止まり、腕の力だけで切削したためである。

数値としても、手首の最高速度点(縦線c)から切削終了点(縦線d)の間の頭と手首の速度差の絶対値は、熟練指導員4名の平均で 184.21 ± 43.64 (mm/s)、訓練生10名の平均で 222.62 ± 84.00 (mm/s) となり、熟練指導員の方が速度差が小さい ($p < 0.01^{*6}$)。また、頭と手首の速度のスピアマン相関係数は、熟練指導員4名の平均で 0.93 ± 0.02 (全て $p < 0.01$)、訓練生10名の平均で 0.61 ± 0.24 (全て $p < 0.01$) となり、熟練指導員の方が同期した動きをしている ($p < 0.01^{*6}$)。

以上のことから、切削時の上体剛体化度合いはヤスリがけ動作の習熟度合いの目安とできる。本研究では、これを上体剛体化尺度 (R (Upper Body Rigidity Measure)) とした。

4.3 事前加速尺度 (A)

3.1節におけるヤスリがけ動作の分析から、技能者は切削前に加速して切削に使うエネルギーを貯めていることが分かっている。熟練指導員4名の頭部最高速度の平均は 1319.45 ± 274.11 (mm/s)、訓練生の頭部最高速度は 581.48 ± 149.53 (mm/s) であり、熟練指導員の頭部最高速度は訓練生の最高速度よりも大きい ($p < 0.01^{*6}$)。従って、切削時の頭部最高速度はヤスリがけ動作の習熟度合いの目安とできる。本研究は、これを事前加速尺度 (A (Pre-Acceleration Measure)) とした。

4.4 安定性尺度 (S)

前述の3尺度によって、訓練生を評価したところ、明らかに指導員の主観評価と乖離した評価が、数人の訓練生に見受けられた。それに対して指導員にヒアリングを

実施したところ、評価が乖離していた訓練生は30回の切削中に数回の引っかかりが発生していることが分かった。そこで切削が安定的しているかどうかを表現する安定性尺度 (S (Stability Measure)) を導入した。

5. 提案評価尺度による熟練指導員の主観評価値の再現

我々は、前章で構築した4種類の評価尺度と訓練生10名に対する熟練指導員の主観評価値から、重回帰分析と残差偏差の最小化によって熟練指導員の主観評価値を再現した (修正 $R^2 = 0.90$, $p < 0.1$, $N = 10$)。

本節では、まず収集した熟練指導員の主観評価値の詳細について述べる。次に、重回帰分析での利用に向けて尺度 L , R , A 間の相関度合いを確認した結果について述べる。その後、重回帰分析に用いた式、並びに、重回帰分析結果の解釈について述べる。

5.1 熟練指導員の主観評価値収集と事後処理

熟練指導員4名(全て元技能五輪選手)と訓練生10名に対する主観評価値を、前述の4名を含む熟練指導員5名から収集した。収集ではヤスリがけの録画映像を利用し、評価は表1に示した9項目に各2点の18点満点とした。その後、熟練指導員間の主観評価基準値のズレを補正するため、各熟練指導員の訓練生評価値の平均が1になるように正規化した。なお、前述のとおり、表1の評価項目は熟練指導員らの相談によって決定されており、各項目は指導員らの普段の指導・評価軸を反映したものとなっている。

取得した評価値の内、熟練指導員に対する主観評価値は、重回帰分析に利用していない。これは、熟練指導員が全て同じ組織に属しており、役職上の上下関係があるなど、心理的バイアスが強く発揮され、比率尺度として不適当であると考えられるためである。従って、熟練指導員に対する主観評価値は重回帰分析による重み推定には用いず、順序尺度として推定結果の解釈にのみ利用した。

5.2 尺度 L , R , A の相関

重回帰分析に用いる説明変数同士は強い相関を持たないことが望ましい。しかし、尺度 L , R , A は導出に用いる加速度センサ値を共有しているため、強い相関を持つ可能性がある。本研究では、被験者ごとの30回の切削に対して、スピアマン相関係数の算出と検定を行い、尺度 L , R , A の相関を確認した。図5に熟練指導員と訓練生に分けた箱ひげ図として結果を示す。

相関係数は-0.38から0.85まで広く分布しており、定まった傾向は見られない。また、 p 値の分布から、全ての尺度間において、相関があるとも相関がないとも言い切れない。やや高い相関係数を示したのは、訓練生の尺度 L , A 間の相関係数であり 0.59 ± 0.24 である。 p 値

^{*6}K-sample Anderson-Darling Tests[Scholz 87]

図5 提案尺度 L, R, A 間のスピアマン相関係数
(上段: 熟練指導員, 下段: 訓練生)

< 0.05 となった割合も 0.7 であった。しかし、熟練指導員の尺度 L, A 間の相関係数は、 0.43 ± 0.27 と訓練生より低い値を示し、 p 値 < 0.05 となった割合も 0.5 と訓練生より低い値を取った。従って、訓練生の尺度 L, A 間の相関係数はやや高い値を示しているが、上達するに従って相関が弱くなる傾向にあると考えられる。

以上から提案尺度 L, R, A 間に強い相関はなく、重回帰分析に用いる尺度として妥当な尺度であると考えられる。

5.3 重回帰分析と残差最小化による重み推定

本研究で重回帰分析に用いた式を式 (1) に示す。なお、付録に譲った尺度の計算式が示すとおり、 L, R, A は熟練指導員でおよそ 1 を示す。

$$\begin{aligned} score = & (w_1 L + w_2 R + w_3 A \\ & + w_4 LR + w_5 RA + w_6 AL \\ & + w_7 LRA)(1 - w_s S) + b \end{aligned} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} 1, & \text{切削失敗時} \\ 0, & \text{切削成功時} \end{cases} \quad (2)$$

本研究では、4 章で導出した 4 尺度と訓練生 10 名に対する熟練指導員の主観評価値 ($score$) を用いて、式 (1) で重回帰分析を行い、重み $w = (w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6, w_7)$ 、及び、切片 b を推定した。重み w_s は重回帰分析では求めず、重回帰分析後の残差が最小になる値を 0 から 1 の範囲で選択した。 w_s は安定性尺度 (S) に関連しており、切削失敗時に評価を w_s の割合で低減する効果がある。

なお、5.2 節で示したとおり、 L, R, A の間には強い相関があるとはいえないが、無相関ともいえない。

図6 熟練指導員の主観評価と推定評価値の相関性

表3 重回帰分析と残差偏差最小化による重み推定結果

修正 R^2	0.90	w_3	133.77
p 値	0.07	w_4	-119.45
残差偏差	0.12	w_5	-162.15
b	-60.68	w_6	-209.23
w_1	99.20	w_7	255.57
w_2	73.55	w_s	0.69

値は全て小数点以下第 3 位で四捨五入した。

そこで 2 尺度交差項と 3 尺度交差項を導入した。また、赤池情報量規準 (AIC) 値を用いた変数減少ステップワイズ法により、式 (1) が最小の AIC 値として -42.74 を示すことを確認した。

推定結果を表 3 に、熟練指導員の主観評価と重回帰分析結果を用いた推定評価値の相関性を図 6 に示す。

5.4 重回帰分析結果の解釈

修正 R^2 は 0.90 ($p < 0.1$) であり、高い相関が示された。これは、定義した 4 つの評価尺度により、熟練指導員の主観評価を十分に再現できることを示している。提案尺度はヤスリがけ動作の力学構造から導出したものであり、本結果は、熟練指導員らが表 1 に示した主観評価軸の点数付けに用いる経験や勘といった暗黙的経験知とヤスリがけの力学構造との間の関係を明らかにしたものである。

$w_3 > w_1 > w_2$ より、熟練指導員の主観評価 (表 1) は、事前加速尺度に代表されることが分かる。また、事前加速尺度、第 2 種挺子状動作尺度、上体剛体化尺度の順に優先度を付けて指導することで、効率的な技能習得が期待できるものと予想される。

w_s は 0.69 を示しており、これは失敗した切削につい

図7 熟練指導員と訓練生を合わせた推定評価値

注: は熟練指導員による訓練生への主観評価値

て熟練指導員らが評価値を約7割削減していたことを示している。ヒアリングにおいて熟練指導員らは「引っかかることは希に発生するので、その部分は考慮せず評価することが多い」と述べていたが、実際には無意識に減点していたことになる。従って、熟練指導員らが認識していなかった暗黙知の一つを導出できたものと考えられる。

なお、2尺度交差項の重みがマイナスだが、これは各項に共通して内在する要素が抽出されて、重複分を相殺していると解釈できる。例えば $L = AB$, $R = BC$ と共通要素を内包する場合、 $LR = AB^2C$ である。 $w_1L + w_2R - w_3LR = w_1AB + w_2BC - w_3AB^2C$ となり、第3項は前2項で過度に強調された共通要素Bを相殺している。3尺度交差項は L, R, A の全要素に共通する要素を示しており、切片に近い性質を持ち値の大小にかかわらず影響は少なく、255.57と大きな値を取ることに問題はない。

5.5 熟練指導員への推定評価値による妥当性の検証

5.3節で決定した重みを用いて熟練指導員への推定評価値を計算し、訓練生への評価値と比較して妥当性を検証した。熟練指導員と訓練生の推定評価値のグラフを図7に示す。

図7のとおり、熟練指導員に対する推定評価値は全ての訓練生より高く、熟練指導員らの主観と合致した。また、熟練指導員に対する推定評価値の順序も、熟練指導員に対する主観評価値の順序と合致しており、推定結果が妥当である可能性が高い。

なお、本研究では、熟練指導員に対する主観評価値を用いた検定や詳細な分析は行っていない。これは、サンプルが小数であることに加え、同僚に対する主観評価値には強いバイアスが含まれ、分析に不適当と考えられるためである。本件は今後の課題とする。

6. ま と め

本研究では、数百時間に及ぶヤスリがけ訓練時間の削減に向けた効率的な技能習得方法の確立を目指した。効率的な技能習得には、訓練生が自己の評価を均質の指標で随時確認できることが重要であり、熟練指導員らの経験と勘に基づく主観評価を、センサなどを用いて再現する必要があった。そこで本研究では、指導員らの主観評価を「ヤスリがけ動作の基礎要素を複合的に判断したもの」として捉え、基礎要素の評価値と訓練生に対する熟練指導員の主観評価値による重回帰分析と残差偏差最小化から、高い相関性を得て(修正 $R^2 = 0.90$, $p < 0.1$, $N = 10$)、熟練指導員の主観評価値の再現に成功した。

導出した基礎要素は、ヤスリがけ動作の構造を「作用点にかかる力を最大化する力学構造」とした簡素な物理構造への当て嵌めから3つ、熟練指導員へのヒアリングから1つの計4つであり、それぞれから尺度を構築した(第2種挺子状動作尺度(L), 上体剛体化尺度(R), 事前加速尺度(A), 安定性尺度(S))。重回帰分析の推定結果から、熟練指導員の主観評価(表1)は、事前加速尺度に代表されることが分かった。事前加速尺度、第2種挺子状動作尺度、上体剛体化尺度の順に優先度を付けて指導することで、効率的な技能習得が期待できることも判明した。また、失敗した切削の評価値を、熟練指導員が無意識に約7割削減していたことも分かった。

提案尺度 L, R, A はヤスリがけ動作の力学構造から導出したものであり、本結果は、熟練指導員らが表1に示した主観評価軸の点数付けに用いる経験や勘といった暗黙的経験知とヤスリがけの力学構造との間の関係を明らかにしたものである。尺度 S の係数も熟練指導員が無意識下で行っていた減点を明らかにし、熟練指導員らが認識していなかった暗黙知の一つを導出できたものと考えられる。

なお、本研究で用いたセンサはBluetooth経由でスマートフォンなどの小型携帯端末と連携できるため、小型携帯端末ベースの自学自習/指導システムとして運用可能である。今後は提案システムを実際のカリキュラムを通じて利用し、習得時間短縮効果を検証する。また、ヤスリから金属塊にかかる圧力変化や切削時の足圧変化などの分析を加え、人体と周辺機器との相互作用の面からも分析を進める。

謝 辞

本研究の一部は科学技術交流財団の共同研究推進事業の支援を得ました。データ計測と分析にご協力いただいた株式会社デンソー技研センターの皆さまに深く感謝いたします。

◇ 付 録 ◇

A. 評価尺度の計算式

本節では、頭、腰、手首の速度をそれぞれ v^h, v^w, v^r とする。各値の最高値を v_{max}^h のように表す。 v^h が負から正になるポイント(図4の縦線 a)を時刻 0 とし時刻 t における速度を $v^h(t)$ 、最高値時の時刻を $t(v_{max}^h)$ と表す。 v^h が正から負になるポイント(図4の縦線 d)の時刻を $t(v_{last}^h)$ と定義する。また、熟練指導員 (Coach) や訓練生 (Learner) を明記する必要がある場合、 $v^c, v^{h,c}, v^l, v^{h,l}$ などと右上添字に c や l を付加する。

A.1 第2種挺子状動作尺度 (L)

4.1 節のとおり、後ろ足を支点とした第2種挺子状動作ができていれば、頭と腰の最高速度の比は身長と腰高の比と近くなる。また、4.1 節で示したとおり、経済産業省による人間特性基盤整備事業 (size-JPN) 2004-2006 によれば、20 歳台から 40 歳台の日本人の平均身長と平均腰高の比は約 1.7 対 1 である。従って、 L の計算式を式 (A.1) とした。定義から L は平均的な日本人男性が適切に第2種手挺子状動作を行えていれば 1 を示す。

$$L = 1 - \left| 1 - \frac{v_{max}^h / v_{max}^w}{1.7} \right| \quad (\text{A.1})$$

A.2 上体剛体化尺度 (R)

4.2 節で述べたとおり、上体の剛体化ができていれば、切削時の v^h と v^r の差は小さくなる。一方、最高速度が高速であるほど正確な制御が困難となり、 v^h と v^r の差は大きくなると考えられる。従って、 v^h 又は v^r の最高速度が高ければ、多少の速度差を許容することとし、本研究では R を式 (A.2) と定義した。

$$t_s = \begin{cases} t(v_{max}^r), & t(v_{max}^h) \leq t(v_{max}^r) < t(v_{last}^h) \\ t(v_{max}^h), & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$v_{max} = \begin{cases} v_{max}^r, & t(v_{max}^h) < t(v_{max}^r) \\ v_{max}^h, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=t_s}^{t(v_{last}^h)} \frac{|v^h(i) - v^r(i)|}{v_{max}}}{t(v_{last}^h) - t_s}$$

$$R = \frac{r}{r_{mean}^c} \quad (\text{A.2})$$

まず、最高速度が高いほど小さくなる重みを付けつつ、切削中における各時刻の v^h と v^r の差の平均値を求めて中間値 r とする。その後、 r を熟練指導員の平均 r 値 (r_{mean}^c) で除算し、 R が熟練指導員で約 1 を示すように調整した。本研究では熟練指導員 4 名の各 30 回の切削から r_{mean}^c を 0.88 とした。

A.3 事前加速尺度 (A)

4.3 節で述べたとおり、熟練指導員は v^h の値が訓練生と比べて大きい。従って、本研究では A を熟練指導員 4 名の各 30 回の切削における v^h の最高値の平均値 ($\text{mean}(v_{max}^{h,c})$) を用いて、 A が熟練指導員で約 1 を示すように式 (A.3) と定義した。本研究における $\text{mean}(v_{max}^{h,c})$ は 1319.45 だった。

$$A = \frac{v_{max}^h}{\text{mean}(v_{max}^{h,c})} \quad (\text{A.3})$$

A.4 安定性尺度 (S)

Dynamic Time Warping (DTW) により、通常時と異なる加速度波形を検出した場合を失敗切削とした。ヤスリの引っかかりなどを検知できる手首の加速度を計算に用いた。まず各切削を基準として他の切削を DTW で評価し、類似度 (以下、DTW 距離) を得る。続いて、他の切削に対する DTW 距離の中央値が最も小さい切削を基準切削として採用する。中央値を中心として、基準切削までの DTW 距離 (以下、 var) の間に通常の切削は分散していると仮定し、中央値から $2var$ 以内にあるものを成功切削とした。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Ahmadi 09] Ahmadi, A., Rowlands, D., and James, D.: Towards a wearable device for skill assessment and skill acquisition of a tennis player during the first serve, *Sports Technology*, Vol. 2, No. 3-4, pp. 129-136 (2009)
- [Bächlin 11] Bächlin, M. and Tröster, G.: Swimming performance and technique evaluation with wearable acceleration sensors, *Pervasive and Mobile Computing* (2011)
- [Ghasemzadeh 09] Ghasemzadeh, H., Loseu, V., and Jafari, R.: Wearable coach for sport training: A quantitative model to evaluate wrist-rotation in golf, *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, Vol. 1, No. 2, pp. 173-184 (2009)
- [Ghasemzadeh 11] Ghasemzadeh, H. and Jafari, R.: Coordination analysis of human movements with body sensor networks: A signal processing model to evaluate baseball swings, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 11, No. 3, pp. 603-610 (2011)
- [Harding 07] Harding, J. W., Small, J. W., and James, D. A.: Feature extraction of performance variables in elite half-pipe snowboarding using body mounted inertial sensors, in *Proc. SPIE 6799, BioMEMS and Nanotechnology III*, pp. 679917-679928 (2007)
- [Harding 08a] Harding, J., Mackintosh, C., Martin, D., Hahn, A., and James, D.: Automated scoring for elite half-pipe snowboard competition: important sporting development or techno distraction?, *Sports Technology*, Vol. 1, No. 6, pp. 277-290 (2008)
- [Harding 08b] Harding, J., Toohey, K., Martin, D., Hahn, A., and James, D.: Technology and Half-Pipe Snowboard Competition — Insight From Elite-Level Judges (P240), *The Engineering of Sport 7*, pp. 467-476 (2008)
- [Heinz 06] Heinz, E., Kunze, K., Gruber, M., Bannach, D., and Lukowicz, P.: Using wearable sensors for real-time recognition tasks in games of martial arts—an initial experiment, in *IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*, pp. 98-102 (2006)
- [Jafari 07] Jafari, R., Bajcsy, R., Glaser, S., Gnade, B., Sgroi, M., and Sastry, S.: Platform Design for Health-Care Monitoring Applications, in *Proceedings of the 2007 Joint Workshop on High Confidence Medical Devices, Software, and Systems and Medical Device Plug-and-Play Interoperability*, pp. 88-94 (2007)
- [Kawakami 08] Kawakami, M. and Fujinami, T.: On the Effect of Performance Evaluation in Acquiring Samba Rhythm, in *10th International Conference on Music Perception and Cognition*, 2008, pp. 132-139 (2008)
- [Kojima 09] Kojima, K., Mase, K., Tokai, S., Kawamoto, T., and Fujii, T.: On-Body Multi-Sensor Analysis of Metal Filing Performance for Manufacturing Skill Training, *IEEE International Symposium on Wearable Computing 2009 (ISWC'09)*, *Advances in Wearable Computing 2009*, pp. 21-28 (2009)
- [Komura 02] Komura, T., Kuroda, A., and Shinagawa, Y.: Nice-MeetVR: facing professional baseball pitchers in the virtual batting cage, in *Proceedings of the 2002 ACM symposium on Applied computing*, pp. 1060-1065 (2002)
- [Lapinski 09] Lapinski, M., Berkson, E., Gill, T., Reinold, M., and Paradiso, J. A.: A distributed wearable, wireless sensor system for evaluating professional baseball pitchers and batters, in *IEEE International Symposium on Wearable Computers 2009 (ISWC'09)*, pp. 131-138 (2009)
- [Matsumura 11] Matsumura, K., Yamamoto, T., and Fujinami, T.: The role of body movement in learning to play the shaker to a samba rhythm: An exploratory study, *Research Studies in Music Education*, Vol. 33, No. 1, pp. 31-45 (2011)
- [Murata 01] Murata, A.: Shoulder joint movement of the non-throwing arm during baseball pitch—comparison between skilled and unskilled pitchers, *Journal of Biomechanics*, Vol. 34, No. 12, pp. 1643-1647 (2001)
- [Robinson 11] Robinson, M., Holt, L., Pelham, T., and Furneaux, K.: Accelerometry Measurements of Sprint Kayaks: The Coaches' New Tool, *International Journal of Coaching Science*, Vol. 5, No. 1, pp. 45-56 (2011)
- [Scholz 87] Scholz, F. and Stephens, M.: K-sample Anderson-Darling tests, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 82, No. 399, pp. 918-924 (1987)
- [Spelmezan 09] Spelmezan, D., Schanowski, A., and Borchers, J.:

Wearable automatic feedback devices for physical activities, in *Proceedings of the Fourth International Conference on Body Area Networks, BodyNets '09*, pp. 1:1–1:8, ICST, Brussels, Belgium, Belgium (2009), ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering)

[Theobalt 04] Theobalt, C., Albrecht, I., Haber, J., Magnor, M., and Seidel, H.-P.: Pitching a baseball: tracking high-speed motion with multi-exposure images, in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 23, pp. 540–547 (2004)

[Yamamoto 08] Yamamoto, T. and Fujinami, T.: Hierarchical organization of the coordinative structure of the skill of clay kneading, *Human Movement Science*, Vol. 27, No. 5, pp. 812–822 (2008)

〔担当委員：西村 拓一〕

2012 年 11 月 30 日 受理

著 者 紹 介

榎 優 (正会員)

2010 年 立命館大学大学院理工学研究科博士課程後期課程修了。2010 年 4 月～2011 年 3 月 同大助手。2011 年 4 月～2013 年 3 月 名古屋大学情報科学研究科研究員。2013 年 4 月～現在 同特任助教。2011 年 4 月～現在 愛知県重点研究プロジェクト 3 超早期診断技術開発プロジェクト G3S3 の研究に従事。専門分野: ユビキタス・ウェアラブル。情報処理学会、バイオメカニズム学会、各会員。博士 (工学)。

間瀬 健二 (正会員)

1979 年 名大・工学部・電気卒。1981 年 同大大学院工学研究科修士 (情報) 課程修了。同年 日本電信電話公社 (現在 NTT) 入社。1988-1989 年 米国 MIT メディア研究所客員研究員。1995-2001 年 (株) ATR 知能映像通信研究所第二研究室室長。2001-2002 年 ATR メディア情報科学研究所第一研究室室長。2002 年より 名古屋大学教授。現在 同大学院情報科学研究科所属。人工知能学会 1999 年度論文賞。電子情報通信学会フェロー。博士 (工学)。