

ウェアラブル加速度・角速度センサを用いた ヤスリがけ技能評価の検討

A Study of Metal-Filing Skill Level Assessment with Wearable Acceleration/Gyroscope Sensor

榎堀 優^{1*} 間瀬 健二¹
Yu Enokibori¹ Kenji Mase¹

¹ 名古屋大学 大学院情報科学研究科

¹ Graduate School of Information Science, Nagoya University

Abstract: This paper presents a method to evaluate a person's skill level for metal filing. We used wearable accelerometer/gyroscope sensors and collected data from 4 expert coaches and 10 learners. The data are analyzed from the viewpoint of the mechanical structure of their bodies during metal filing. Our analysis yielded two effective measures for skill assessment: "Class 2 Lever-like Movement Measure" and "Upper Body Rigidity Measure". The weighted total measure succeeded in distinguishing the coach group and the learner group as individual skill level groups at a 95% confidence level. The highest-level learner, the lowest-level learner, and the group of other learners were also able to be distinguished as individual skill level groups at a 95% confidence level; this is the same result as an expert coach's subjective score.

1 はじめに

本論文はヤスリがけ技能をウェアラブル加速度・角速度センサを用いて評価する手法について述べる。熟練者のヤスリがけは、多くの工程が産業ロボットにより自動化された現在においても、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などは、マザーマシ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が、その場合、熟練技能者がナノメートル精度のヤスリがけで除去している。しかし、このような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。したがって、効果的なトレーニング手法による技能者の育成が求められている。

しかし、現在であってもヤスリがけの指導はコーチングにより行われており、科学的な指標が確立していない。さらに、コーチングの行い方は指導員ごとに異なり、ま

た、技能の評価も指導員ごとに主観で行っているのが現状である。その結果、習得には数百時間の時間が必要となっている。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、全ての熟練技能の基礎となる「ヤスリがけ」技能を数百時間の時をかけて教育している。

そこで本研究では、訓練生が客観的に技能レベルを把握して効率的な学習を行えるようにするべく、ウェアラブル加速度・角速度センサを用いたヤスリ掛け技能評価手法を構築した。我々は、熟練指導員4名と同じ学年の訓練生10名のヤスリがけ動作データを収集し、ヤスリがけ動作の機械的構造に着目して分析を行った。その結果、「第2種槌子状化」「上体剛体化」の2つの特徴を導出した。また、導出したそれぞれの特徴について尺度と重み付き線形和である総合尺度を定義した。定義した総合尺度はU検定において、熟練指導員グループと訓練生グループの切り分けに信頼度95%で成功した。その他、同様のU検定で、訓練生の中で特に秀でたもの1名、特に学習が遅れているもの1名、その他の訓練生の3グループについて、信頼度95%で切り分けに成功した。これは事前に得ていた熟練指導員1名による主観評価と合致しており、本手法の妥当性を示している。

* 連絡先：名古屋大学大学院情報科学研究科
〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学 IB 電子情報館
西棟7階731号室 大学院情報科学研究科 間瀬研究室
E-mail: enokibori@cmc.ss.is.nagoya-u.ac.jp

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

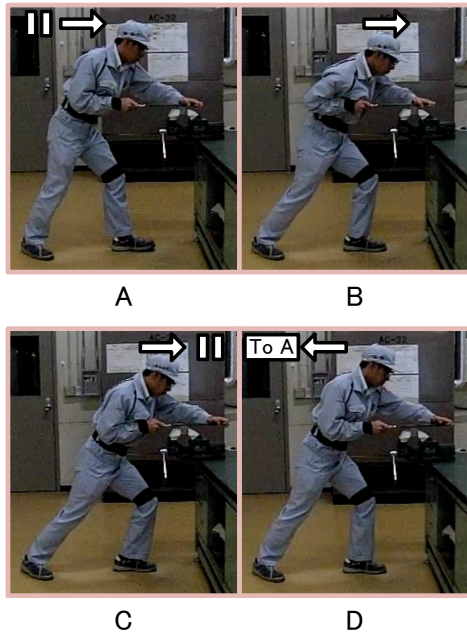


図1 ヤスリがけ動作の主な4状態

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

2 関連研究

ウェアラブルセンサを用いた技能評価と学習補助は、特にスポーツの分野においての成果が著しい。

野球の技能評価は、もっとも盛んに研究されている分野の一つである [1, 2] Ghazemzadeh ら [3] は 3 軸加速度センサおよび 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。この他に、Harding ら [4] は慣性センサおよび 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性を示した。Robinson ら [5] は加速度センサを用いて、カヤックの技能レベルを評価した。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。

ヤスリがけ動作については、Kojima ら [6] 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分析している。しかし、ピーク値の出現タイミングのみを扱っているため、ヤスリがけ動作の体全体の動きの連動について分析できていない。上記の様に、ものづくりの技能、特にヤスリがけについての研究は不十分であり、適切な評価指標を整備する必要がある。

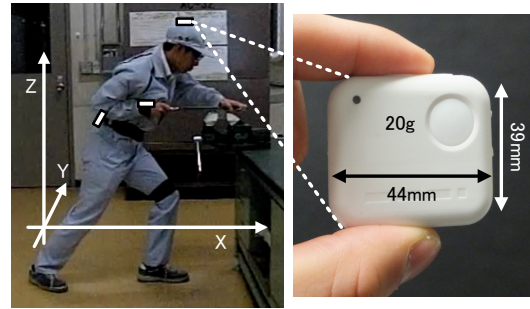


図2 ハイブリッドセンサ WAA010 と装着箇所

表1 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 Ver2.0+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	±2 G to ±16 G	±2000 deg/s
本研究で用いた設定		
サンプリングレート	100 Hz	100 Hz
最大検出範囲	±8 G	±2000 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。

3 ヤスリがけ動作の分析

ヤスリがけの基本的な 4 動作を図 1 に示す。本節では、本研究で用いたセンサ、センサ設定の詳細、センサの装着箇所について述べた後、我々が着目したヤスリがけ動作の機械的構造について述べる。合わせて、熟練指導員と訓練生のセンサデータと比較した妥当性の検証結果を述べる。

3.1 データ取得環境と事後データ処理

我々は 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 に検証に利用したセンサとその装着箇所を示す。また、表 1 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。また、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

^{*2} ATR-Promotions 小型無線ハイブリッドセンサ (WAA-010): <http://www.atr-p.com/sensor10.html>

(A から C は図 1 の A から C と同様である)

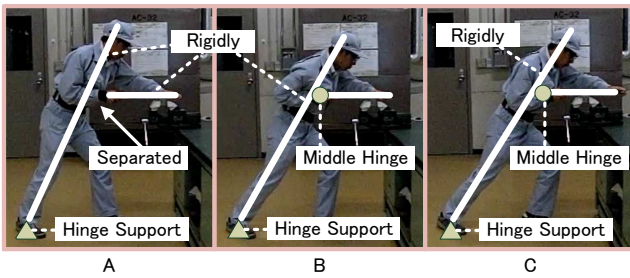


図 3 待機状態から切削終了までの機械的構造

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およそ 0 になるように誤差とドリフト値を排除した。

3.2 ヤスリがけ動作の機械的構造

本研究では「1: 後ろ足から頭頂部にかけての第 2 種挺子状動作」と「2: 切削時の上体剛体化」に着目した。図 3 に図 1 の A から C の動作における人体の機械的構造を示す。なお、熟練技能者からのコメント「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た。熟練指導員と典型的な訓練生の切削時における各部位の X 軸方向の速度を図 4 に示す。なお、以後本稿では X 軸方向の速度のみを扱う。以後、速度と表記する場合、明記が無い限り各部位の X 軸方向の速度を指すものとする。

3.2.1 後ろ足から頭頂部にかけての第 2 種挺子状動作

前方の足を無視する場合、ヤスリがけ動作は図 3 に示すように、後方の足を回転支点 (HingeSupport) とした第 2 種挺子状の構造と推測される。これは図 4 に示した熟練指導員の頭と腰の速度から裏付けられる。熟練指導員の頭と腰の最高速度の比は熟練指導員 4 名の平均で 1.64 ± 0.22 対 1 であった。これは経済産業省による人間特性基盤整備事業 (size-JPN) 2004-2006[7] にある 20 歳台から 40 歳台日本人の平均身長である約 170.65 cm と平均肘頭高-3cm^{*3}である 100.80 cm の比である 1.69 対 1 と近い。物体が円運動をする場合、各部の速度の比

^{*3} size-JPN 2004-2006 にはウエスト高のデータが無いので肘頭高で代用した。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引いている。

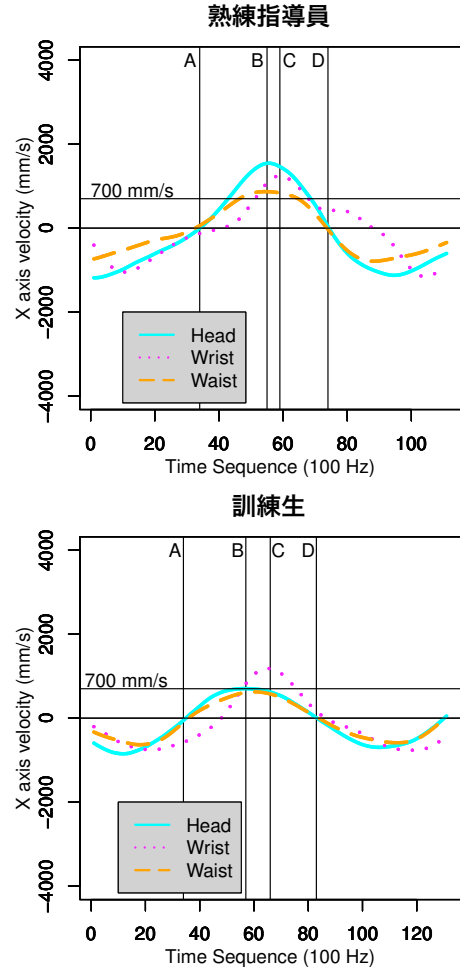


図 4 熟練指導員と訓練生各部位の速度

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。

は中心点からの距離の比と同じとなるため、ヤスリがけ時の後ろ足から頭頂部にかけての動作は、後ろ足を回転支点とした挺子状動作であると言える。

図 4 に示した通り、訓練生のグラフは頭と腰の速度の比が十分ではなく、後ろ足から頭頂部にかけての挺子状動作が行えていないことが分かる。そのため、事前加速で獲得した運動エネルギーを第 2 種挺子状動作によって増幅できていない。以上のことから、本特徴はヤスリがけ動作の習熟度合いの目安とできる。

3.2.2 切削時の上体剛体化

技能者がもっとも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が条件となる。これは図 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一塊の剛体のように振る舞う状態のことで

ある。熟練技能者ほど、切削時に人体及びヤスリを剛体として動作させているものと考えられる。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によって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。なお、下半身から頭頂部にかけての剛体化は第3.2.1節の尺度で評価できるため、本項目では上半身から腕の剛体化を扱う。

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、頭と手首の速度がほぼ同じとなっている。同様の特徴は他の全ての熟練指導員においても観測された。

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。以上のことから、切削時の上体剛体化度合いはヤスりがけ動作の習熟度合いの目安とできる。

4 機械的構造に着目した評価尺度

第3章の分析から、機械的構造に基づく2つの尺度を策定した。

- 第2種挺子状動作尺度 (L)
- 上体剛体化尺度 (R)

また、上記の2つの評価指標に重みを付けて統合した以下の総合評価尺度を定義した。

- 総合評価尺度 (T)

本節では、各指標の計算式について述べる。なお、 L, R の2尺度は熟練者で約5を示すように調整した。

以後、頭、腰、手首の速度を v^h, v^w, v^r とする。各値の最大値を v_{max}^h のように表す。 v^h が負から正になるポイント(図3のA)を時刻0とし時刻 t における速度を $v^h(t)$ 、最大値時の時刻を $t(v_{max}^h)$ と表す。 v^h が正から負になるポイント(図3のC)の時刻を $t(v_{last}^h)$ と定義する。また、指導員(Coach)や訓練生(Leaner)を明記する必要がある場合、 $v^c, v^{h,c}, v^l, v^{h,l}$ 等と表記する。

4.1 第2種挺子状動作尺度 (L)

第3.2.1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、頭と腰の最大速度の比は約1.7:1となる。したがって、 L の計算式を式(1)とした。

$$L = 5 \left(1 - \left| 1 - \frac{v_{max}^h/v_{max}^w}{1.7} \right| \right) \quad (1)$$

4.2 上体剛体化尺度 (R)

第3.2.2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 はほぼ等しくなる。一方、最大速度が高速であるほど正確な制御が困難となる。したがって、 v^h または v^r の最大速度が高ければ、多少の速度差を許容することとする。本研究では R の計算式を以下の様に定義した。計算式は、最大速度が速いほど小さな重みを付けた各時刻における v^h と v^r の差の平均値を求め、熟練者で約5を示すように調整している。

$$t_s = \begin{cases} t(v_{max}^r), & t(v_{max}^h) \leq t(v_{max}^r) < t(v_{last}^h) \\ t(v_{max}^h), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$v_{max} = \begin{cases} v_{max}^r, & t(v_{max}^h) < t(v_{max}^r) \\ v_{max}^h, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$r = 1 - \frac{\sum_{i=t_s}^{t(v_{last}^h)} \frac{|v^h(i) - v^r(i)|}{v_{max}}}{t(v_{last}^h) - t_s} \quad (4)$$

$$R = \frac{r}{r_{mean}^c/5} \quad (5)$$

r_{mean}^c は熟練指導員の切削における r の平均値である。本研究では熟練指導員4名の各30回の切削における平均値を用い、 $r_{mean}^c/5$ を0.17とした。

4.3 総合評価尺度 (T)

本研究では各指標に重みを付け、総合評価 T を式(6)の通り定めた。重みは $(w_1, w_2) = (1.5, 2.0)$ とした。

$$T = w_1 L + w_2 R \quad (6)$$

L の重みが R よりも小さい理由は次の通りである。 L は頭と腰の高さの比を1.7:1と仮定している。身長や体つきには個人差があるため、適切な比は個人個人で異なる。そのため、頭と腰の高さの比が1.7:1から外れている技能者は数値が低く出る傾向にある。したがって、 R に比べ重みを小さくした。

5 提案尺度を用いたヤスりがけ動作分析と妥当性検証

本節では、4名の熟練技指導員(C1からC4)と10名の訓練生(L1からL10)のデータを第4章で策定した尺度で評価し、考察を述べる。また、評価結果から提案尺度の妥当性を検証する。4名の熟練指導員は全て元技能五輪選手であり、現在も訓練生の指導を行っている。10名の訓練生は全て同一の学年、同一のクラスに所属して

おり、技能レベルはおおむね同じ程度である。本研究では、熟練指導員1名の主観評価により、全被験者の順位付けを行った。前述のラベルC1~C4, L1~L10は主観評価技能レベルが高い順である。また、同じ主観評価において「訓練生10名はほぼ同じ技能レベルであるが、L1が頭一つ抜け出ており、L10が一段階技能レベルが低い」と定義された。

5.1 取得データと評価値

本評価では、ヤスリがけ開始10秒後から30回分の切削を評価した。表2に重み付け後の各指標値の平均値と標準偏差を示す。また、図5に30回の総合評価尺度値の箱ひげ図を示す。

5.2 提案尺度を使った指導例

表2のように、L3, 4, 9, 10はLが低い。原因は体が前傾せずに上体が起きたまま前方へ移動していると考えられる。したがって、後ろ足を起点として、膝を伸ばし、前傾するように指導することが有効だと考えられる。

表2のように、L3, 6, 7, 10はRが低い。したがって、脇と肘の固定が緩い可能性が高い。彼らは、体が先に止まって腕の力だけで切削してしまうか、腕が体より前方へ進んで固定が甘くなり、切削面が安定しないかのどちらかである。したがって、脇と肘を締めるように指導することが有効だと考えられる。

5.3 総合評価尺度の妥当性検証

総合評価尺度の妥当性検証をU検定により検証した。標本数が20以下と少数であるため、数表を用いた。

U検定を、指導員グループの平均値と訓練生の平均値に対して行った結果 $U = 0$ となった。U検定における4対10の数表より $U = 0 \leq 5$ であるため信頼水準95%で異なり、切り分けに成功した。

続いて、熟練指導員の主観評価コメントの通り、L1, L2からL9, L10の3グループが切り分けられるかを検証した。U検定の数表が対応する最低標本数が2であるため、L1とL10を $n=15$ の2標本として扱った。L1, L10の2分割標本の平均値と標準偏差は、小数点第3位を四捨五入して 16.23 ± 0.99 と 16.50 ± 0.62 、及び、 11.62 ± 1.17 と 11.21 ± 0.82 であった。指導員と訓練生の切り分け検証と同様にU検定を行った結果、L1対L2-L9とL2-L9対L10は共に $U = 0$ であった。U検定の2対8の数表より $U = 0 \leq 0$ であるため信頼水準95%で切り分けに成功したと言える。

一方、L2からL9に掛けての評価値は事前に得ていた熟練指導員1名の主観評価と異なっている。加えて、指導員の主観では、指導員グループとL1の技能差は、図5に図示されたものより大きかった。

6 まとめ

本研究では、訓練生が客観的に技能レベルを把握して効率的な学習を行えるようにするべく、ウェアラブル加速度・角速度センサを用いたヤスリ掛け技能評価手法を構築した。機械的構造である「後ろ足から頭頂部にかけての第2種梃子状動作」と「切削時の上体剛体化」に着目して、第2種梃子状動作尺度L, 上体剛体化尺度R, 重み付き線形和である総合評価尺度Tを定義した。

第5.3節の議論の通り、提案尺度はおおむね指導員の主観評価と合致する結果となった。一方、L2からL9に掛けての評価値による順序は、事前に得ていた熟練指導員1名の主観評価と異なる。加えて、指導員の主観では、指導員グループとL1の技能差は、図5に図示されたものより大きいという結果であった。したがって、他の尺度の策定や他の熟練指導員による主観評価値を得て比較するなどの検討を今後の課題とする。

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て行われました。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に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] C. Theobalt, I. Albrecht, J. Haber, M. Magnor, and H.P. Seidel. Pitching a baseball: tracking high-speed motion with multi-exposure images. In *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 23, pp. 540–547. ACM, 2004.
- [2] M. Lapinski, E. Berkson, T. Gill, M. Reinold, and J.A. Paradiso. A distributed wearable, wireless sensor system for evaluating professional baseball pitchers and batters. In *Wearable Computers, 2009. ISWC'09. International Symposium on*, pp. 131–138. IEEE, 2009.
- [3] H. Ghasemzadeh and R. Jafari. Coordination analysis of human movements with body sensor networks: A signal processing model to evaluate baseball swings. Vol. 11, No. 3, pp. 603–610, 2011.

表2 重み付け後の尺度値と標準偏差

	C1	C2	C3	C4	L1	L2	L3
<i>L</i>	7.04 ± 0.32	6.68 ± 0.31	6.37 ± 0.57	6.42 ± 0.35	6.97 ± 0.36	5.15 ± 0.47	4.65 ± 0.45
<i>R</i>	10.39 ± 0.53	9.90 ± 0.38	10.24 ± 0.64	10.34 ± 0.45	9.39 ± 0.79	9.15 ± 0.77	8.55 ± 1.10
<i>T</i>	17.43 ± 0.63	16.58 ± 0.54	16.61 ± 0.85	16.76 ± 0.67	16.37 ± 0.82	14.31 ± 0.83	13.20 ± 1.20
	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
<i>L</i>	4.27 ± 0.45	5.27 ± 0.39	5.20 ± 0.36	6.72 ± 0.44	6.30 ± 0.79	4.61 ± 0.54	3.98 ± 0.45
<i>R</i>	9.26 ± 1.21	9.83 ± 0.40	7.93 ± 0.69	8.83 ± 0.60	9.16 ± 0.78	9.68 ± 0.99	7.44 ± 0.78
<i>T</i>	13.52 ± 1.47	15.10 ± 0.54	13.13 ± 0.69	15.55 ± 0.66	15.47 ± 1.38	14.29 ± 1.14	11.42 ± 1.02

値は全て小数点以下第3位で四捨五入した。

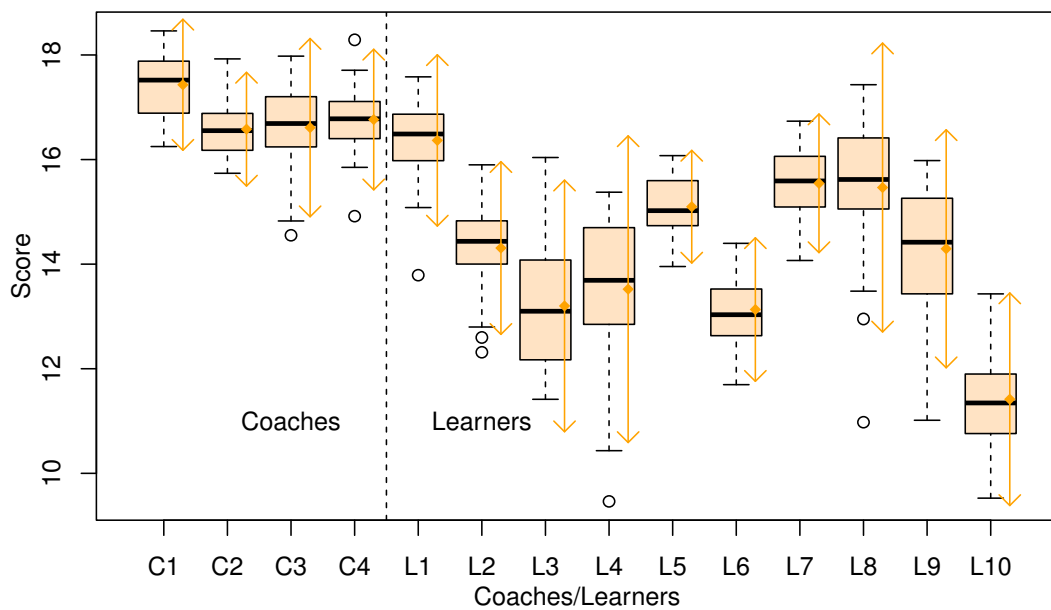


図5 熟練指導員4名と訓練生10名の総合評価尺度値(箱ひげ図)

値は小数点第3位を四捨五入した。箱は第1四分位点(Q1)と第3四分位点(Q3)の範囲を示す。箱中の横線は中央値である。上下方向への破線は、それぞれQ1とQ3から1.5倍範囲内の最高/最低値を示す。それより外の外れ値は丸点として描画した。矢印の中間にある点は平均値である。矢印は 2σ の範囲を示す。

- [4] J.W. Harding, K. Toohy, D.T. Martin, A.G. Hahn, and D.A. James. Technology and half-pipe snowboard competition — insight from elite-level judges (p240). *The Engineering of Sport* 7, pp. 467–476, 2008.
- [5] M.G. Robinson, L.E. Holt, T.W. Pelham, and K. Furneaux. Accelerometry measurements of sprint kayaks: The coaches' new tool. *The Coach Education Internship Experience: An Exploratory Study/3 Kristen D. Dieffenbach West Virginia University, USA Melissa Murray The University of Southern Mississippi, USA*, p. 45, 2011.
- [6] Keita Kojima, Kenji Mase, Shogo Tokai, Tetsuya Kawamoto, and Toshiaki Fujii. On-body multi-sensor analysis of metal filing performance for manufacturing skill training. *IEEE International Symposium on Wearable Computing (ISWC2009), Advances in Wearable Computing 2009*, pp. 21–28, 2009.
- [7] size-JPN 2004-2006. <http://www.meti.go.jp/press/20071001007/20071001007.html>, October 7 2007.