

複数筋電位の可視化による重筋作業分析についての一検討

A study on physical labor analysis using plural myopotential visualization

中屋敷恒¹ 松田浩一¹

Hisashi Nakayashiki¹, Koichi Matsuda¹

¹岩手県立大学

¹Iwate Prefectural University

Abstract:

Skilled workers of physical labor are performed efficiently work using a variety of skills. Skilled workers obtained skills from many years of experience. Therefore, it is difficult to find skills for beginners. In this paper, we propose a visualization method for the skill of skilled workers using the myopotential. In previous research, there are many methods of analysis for a single operation. However, it is not a suitable analysis method for physical labor's skill. We propose an analysis technique suitable for physical labor's work. By using the proposed method, it enables to compare the entire sequence of working with other workers.

1. はじめに

熟練作業員は様々な技能を駆使し効率的に作業を行っている。従来、作業の技能伝達は口頭指導や紙面学習で行われてきた。この熟練作業員の技能は長年の経験から得られる感覚的な情報であり、伝達が困難な場合がある。

とりわけ、重い部品の取り付けなどを行う重筋作業においては、作業が単純であるために、技能を伝えるような内容ではないと現場では捉えられているようである。しかし、熟練者と初心者の作業の様子を観察すると、経験による作業効率の差は確実にある。作業員へのインタビューからも、経験年数の浅い作業員は、作業が不正確であったり、作業時間が熟練者よりも長くなったり、疲労がたまりやすいなどの課題を抱えているということが分かってきた。特に疲労の蓄積は、作業の非効率化や腰痛などにつながる要因と考えられており、熟練者は、疲労が蓄積しにくい作業方法を経験的に行っていると思われる。

重筋作業の巧拙は、純粋な筋力の差によるものではなく、熟練者は経験による負荷軽減の技能の駆使しており、その技能の有無による違い

によるものであると考えている。しかし、熟練者自身がどのように工夫をして負荷を軽減しているのかを認識していないことが多いため、そもそも何を教えるべきかが分かっていないという問題がある。

筋疲労を可視化する方法の一つとして筋電位の分析がある[1]。筋電位を用いた動作分析に関する研究は数多く存在し、その中でも周波数解析を用いた分析方法が用いられる研究[2][3][4]が多い。周波数解析では動作が維持や繰り返しといった単一動作であるものや、筋電図で得られた波形がほぼ一定であるものに対して解析を行っている。しかし、ヒトが実際に行う作業(歩行・書字など)は様々な動作を含んでおり、かつ筋電図で得られる波形が動的なものであるため周波数解析には適していない。

本稿では重筋作業に適した動作比較手法を提案する。重筋作業において着目したのは、両足の荷重である。作業の観察結果より、熟練者は全体的に体軸の移動がスムーズであり、かつ、体軸がブレない様子が見て取れた。体軸の安定により、楽で効率的な動作をしていることが予想されるが、その体軸を制御している両足の筋肉に着目し、複数部位の筋活動を複数回・複数

人で比較することで技能を見つけることができると考えた。

提案手法により、重筋作業の一連の作業における他者間の比較を可能とし、作業負荷の異なる原因の特定を行う。筋疲労の差が表れる要因を可視化し、提示することで経験年数の浅い作業員の作業効率の改善が期待される。

2. 筋電位による筋活動分析

2.1. 積分筋電位

動作分析などの手段の1つとして筋電位(図1)を用いる場合には平均振幅を用いた方法が知られている[5]。平均振幅特徴量の観察方法の1つとして積分筋電位がある。積分筋電位(図2)は筋電信号を全波整流平滑化(積分)した信号である。筋電位原波形より動的なデータに対しての直接的な比較が容易である。

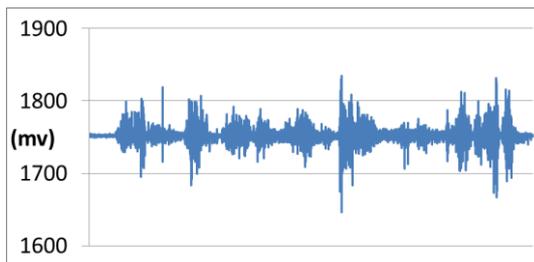


図 1: 筋電位

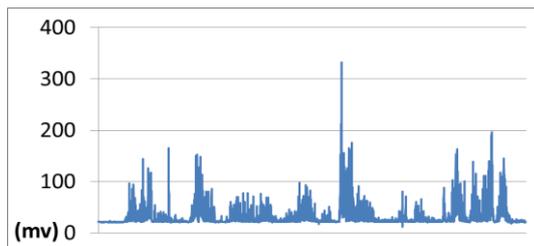


図 2: 積分筋電位

2.2. 積分筋電位比較における課題

繰り返し動作や単一動作に対する分析ならば、積分筋電位を用いた分析法でも十分な比較が行えると考えられる。しかし、ヒトが実際に行う作業の比較を積分筋電位で行う場合、以下の二つの問題がある。(1)一つのデータ内に複数の動作が混在しており、どこが特徴であるかを機械的に判断することが困難、(2)複数の被験筋に対して複数回の実験の施行により大

量のデータ同士の比較を行う必要があるが、大量のデータの積分筋電位の比較から特徴量を見つけ出すことは現実的ではない。

そこで本稿では、複数の被験筋同士の増加減少の関係を分かりやすく提示し、特徴を見つけ出しやすくなるような方法の提案を行う。

3. 提案手法

3.1. 複数筋電位の一覧表示方法

提案手法は、同時に取得した二つの積分筋電位のデータを一覧できる(図3)。本稿では、左右の脚部の同時刻における筋電位を観察できることを想定している。

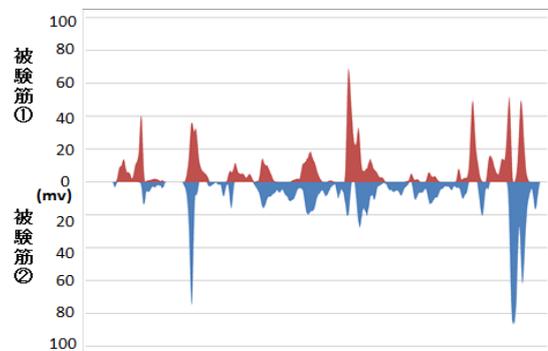


図 3: 複数筋電位表示方法

そのためには、以下の二つの手順を踏む。(1)フィルタ処理、(2)2つのデータの張り合わせ。次節以降で、その手順について述べる。

3.2. フィルタ処理

積分筋電位の特徴として、(1)アーチファクト(本来の筋電位ではなく、外的要因等によって発生する飛び値)が含まれる、(2)全波整流平滑化(積分)により平滑化は行われているが大小の波形の振動が多くなる、が挙げられ、見た目上ノイズの多いデータとなっている。そのことが、複数のデータを比較することを困難にしている。

そこで本手法では、積分筋電位に対する新たな平滑化処理方法を提案する。本処理を用いることで、重筋作業という複数の工程が含まれる動作であっても大局的な電位の変化が読み取りやすくなり比較が容易になる。処理手順を以下に述べる。

- (1) 積分筋電位に対してメディアンフィルタを用いて飛び値の削減を行う(図4)
- (2) メディアンフィルタ適用後のデータに対してバイラテラルフィルタ(式1)を適用し、 $R(n)$ を求め、平滑化処理を行う(図5)

$$R \begin{cases} R(n) = \frac{\sum_{k=-w}^w W(n,k) \cdot R(n+k)}{\sum_{k=-w}^w W(n,k)} \\ W(n,k) = \exp\left\{\frac{k^2}{\sigma_s^2}\right\} \cdot \exp\left\{-\frac{(R(n)-R(n+k))^2}{2\sigma_r^2}\right\} \end{cases} \dots (1)$$

ここで、 n はデータ数、 w は、フィルタ幅、 σ_s 、 σ_r は、平滑化の程度を指定するパラメータである。

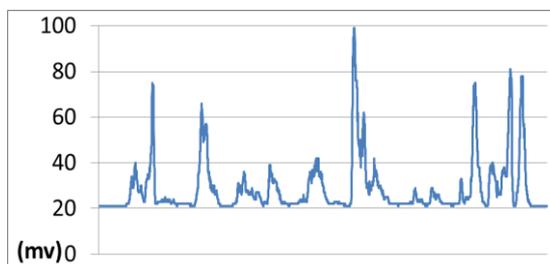


図 4：メディアンフィルタ適用後

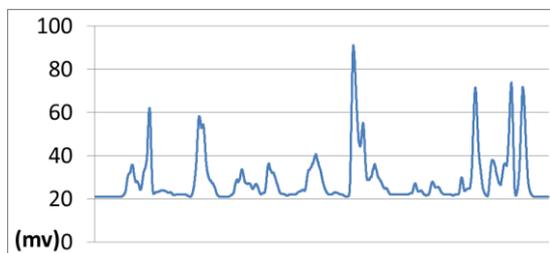


図 5：バイラテラルフィルタ適用後

3.3. 張り合わせ処理

積分筋電位を見やすくするため、複数データのうちの一つの正負を反転し、張り合わせる。そのためには、それぞれのデータの最低値を0に補正する必要がある。しかし、積分筋電位の特性上、最低値が一意に定まらない(図6)ことや、どの程度であれば、筋活動がないと判断すべきかを一意に決めることができない。そこで、筋活動が無いと判断する閾値を決定する必要がある。

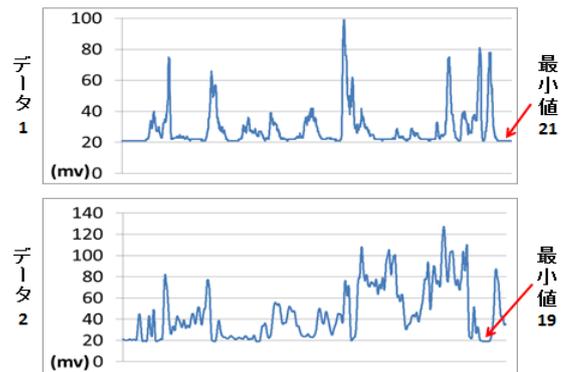


図 6：最小値の異なるデータ

ここで、対象としている作業は、筋活動のON/OFFがあり、特に全体としてはOFFの状態が多いことが分かっている。そこで、以下の手順で閾値を求める。

- (1) 平滑化処理後のデータに対してヒストグラムを求める
- (2) 階級幅を1から始め1ずつ増やす
- (3) 最も低い階級(最小値を含む階級)がヒストグラムの最大値となるまで(2)を繰り返す

上記の手順により、筋活動がOFFとみなせる閾値が決定でき、全体のデータから閾値を引くことで最低値を0とする(図7)。

補正後の複数の平滑化積分筋電位データのうち、一方の正負を反転し、一つのグラフに表示することにより、複数の筋活動における大局的な筋活動の推移の観察を行う。

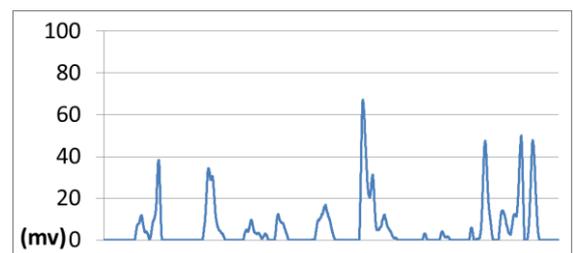


図 7：閾値減算処理後

4. 実験

4.1. 実験方法

自動車組み立て工場の作業員3名(熟練者1名と初心者2名)を対象に実験を行った。本実験では「バンパーの取り付け」作業のデータを

1人につき4回取得した。筋電位の計測には2極湿式センサ(ロジカルプロダクト社製, ワイヤレスEMG ロガー-LP-MS1002, 増幅率500倍)を用いた。対象作業では中腰状態になることが多い作業のため下肢への負荷が大きいと考え、左右大腿筋の筋電位を計測した。取得した筋電位に対して経験的に得た $w=20, \sigma_r=200$ で平滑化処理を行った。また、作業の様子は映像として同時に取得した。

4.2. 実験結果

図 8, 9, 10 に積分筋電位の元波形を, 図 11, 12, 13 に処理後の左右筋電位を上下に配置したものを示す。

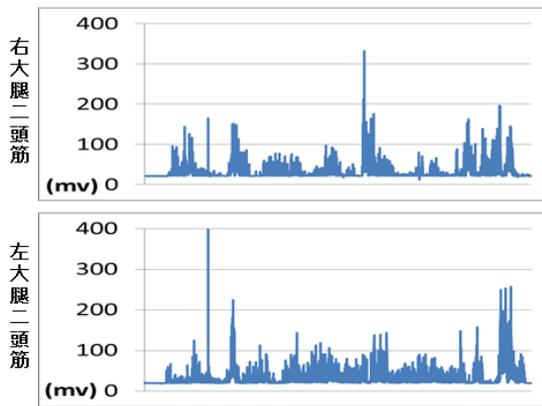


図 8 : 積分筋電位 (熟練者)

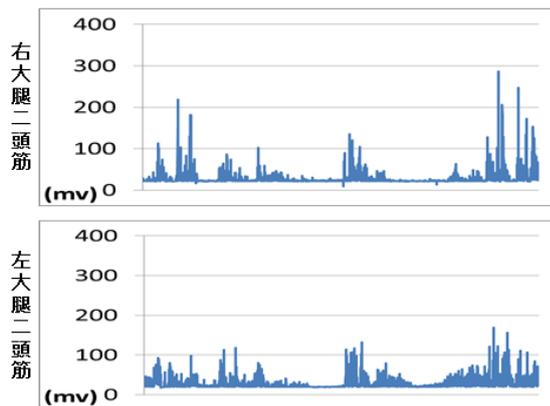


図 9 : 積分筋電位 (初心者 A)

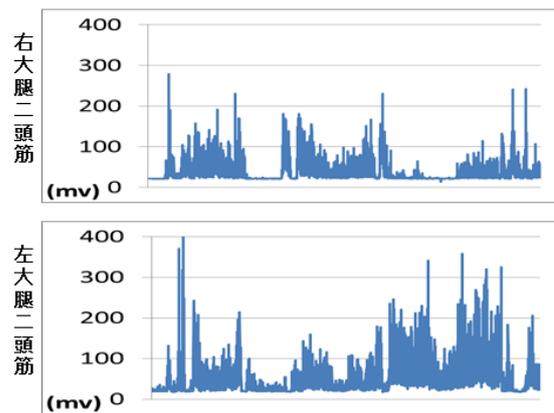


図 10 : 積分筋電位 (初心者 B)

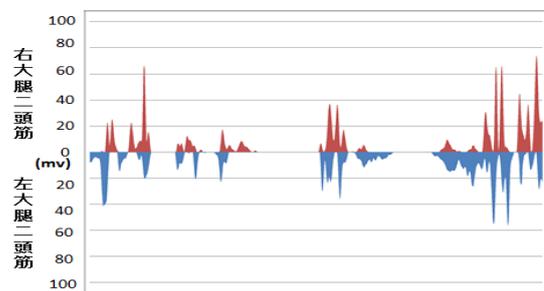


図 11: 提案手法筋電位 (熟練者)

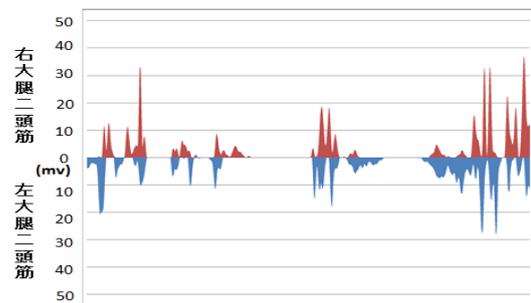


図 12 : 提案手法筋電位 (初心者 A)

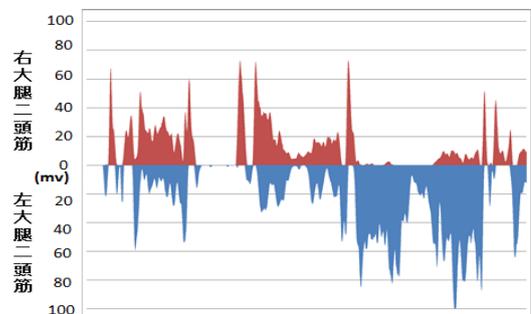


図 13 : 提案手法筋電位 (初心者 B)

図 8, 図 9, 図 10 の積分筋電位元波形では個人における左右筋活動の大まかな流れは把握で

きるが、複数の被験者で比較を行う際には特徴量の発見に時間がかかる。図 11, 12 から熟練者・初心者 A は左右筋活動の推移が滑らかで左右どちらかに大きく偏ることが少なく、両足の筋活動がバランス良く観察できる。図 13 から初心者 B は左右筋活動のどちらかに筋活動が偏っていることが複数箇所を確認できる。このように、提案手法を用いることで熟練者・初心者 A と初心者 B で左右筋活動の推移の特性が異なることが容易に発見できる。

5. 考察

5.1. 相関係数による比較

本節では、提案手法の効果および結果からわかることについて述べる。

実験結果から、左右の筋活動の推移に関係性があることが分かった。ここでは、(a) 作業工程の性質の違い、(b) 作業者ごとの性質の違い、があると考え、以下の手順で比較を行った。

バンパーのとりつけ作業は(1)バンパー取り付け (2)ネジ締め [右側] (3)右側から左側への移動 (4)ネジ締め [左側] (5)作業開始位置に戻る という 5 つの工程に分けられた。取得データを 5 つの工程に分割し、各被験者のそれぞれの工程ごとに筋活動の比較を行った。積分筋電位と平滑化処理後のデータに対して左右の大腿二頭筋の相関係数を求めた結果を図 14～16 に示す。

積分筋電位に対して左右の筋活動の相関係数を求めた場合、見た目には相関が強いと思われるものもあったが、全てのデータで相関係数の絶対値が 0.5 未満となり相関が強いものは見られなかった。積分筋電位では、見た目には見える大局的な筋活動の推移が数値に表れていないと考えられる。それに対し、提案手法のデータに対して相関係数を求めた場合、強い相関がみられるようになった。このことから、提案手法によるフィルタ処理は、見た目の印象と一致する効果が得られていることが分かる。

提案手法の結果を観察すると、前述の二つの要素について数値的な違いが表れた。

(a) 作業工程の性質の違いについて

すべての被験者において区間 1, 3, 5 と区間 2, 4 で比較を行った場合、区間 2, 4 で負の相関の傾向が確認できる。これは区間 2, 4 の「ネジ締め」工程では左右の大腿筋電位が同時に出現することが少ないということになり、どちらか

の大腿筋に負荷がかかっている状態が多い作業ということが分かる。

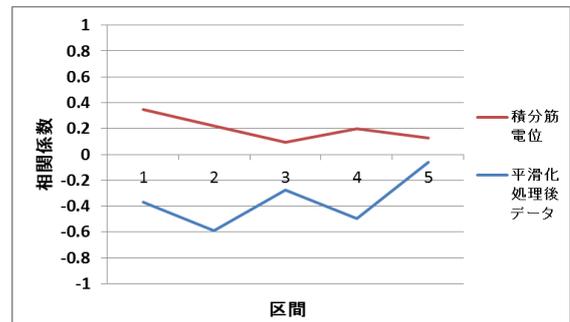


図 14：相関係数（熟練者）

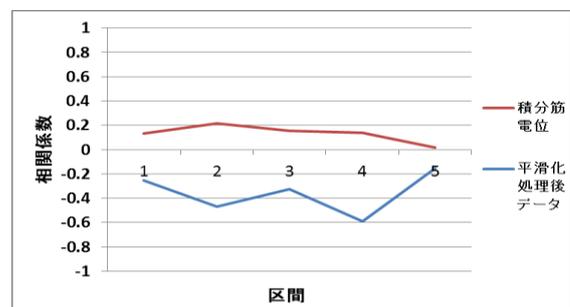


図 15：相関係数（初心者 A）

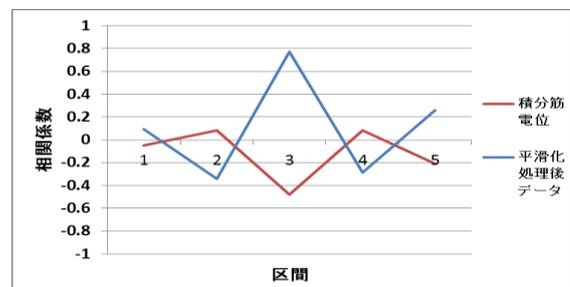


図 16：相関係数（初心者 B）

(b) 作業者ごとの性質の違いについて

初心者 B の相関係数は区間 3 を除き 0 に近い値となった。つまりほとんどの区間で左右の筋活動が同様の性質、もしくは逆の性質を持つという特徴がないということである。それに対して熟練者と初心者 A は多くの区間で負の相関の傾向が見られたため、左右の筋活動が逆の性質をもつという特徴があることが分かる。これは、左右の大腿筋電位が同時に出現することが少ないということになり、スムーズな体重移動ができていないと考えられる。また、その中でも特に区間 2, 4 の「ネジ締め」工程では負の相関の傾向が強く、熟練者・初心者 A と初心者 B で左右筋活動の傾向が大きく個なると考えられる。

5.2. 映像による主観評価との比較

映像による主観評価との比較を行った。熟練者・初心者 A と初心者 B の差が最も顕著であった区間 2 のデータを図 17～19 に示す。

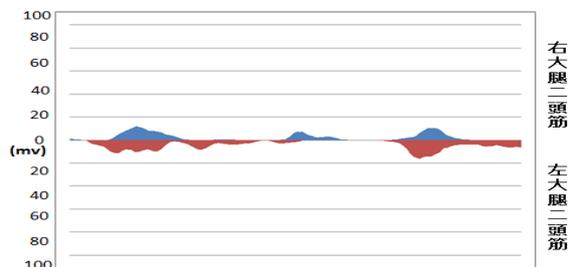


図 17：区間 2 左右筋電位（熟練者）

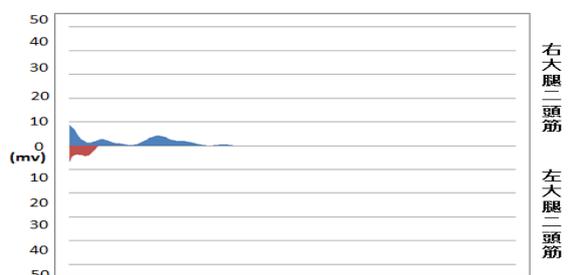


図 18：区間 2 左右筋電位（初心者 A）

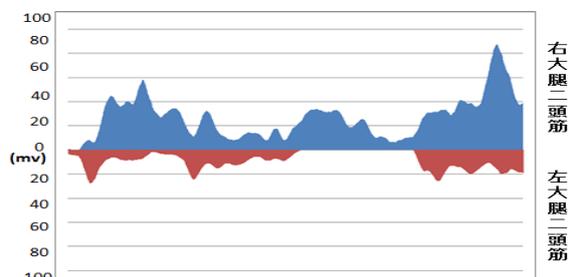


図 19：区間 2 左右筋電位（初心者 B）

表 1：被験者の身長と経験年月

被験者	身長	経験年月
熟練者	178cm	20 年
初心者 A	169cm	1 ヶ月
初心者 B	168cm	1 ヶ月

図 17 より熟練者は右脚と左脚ともに断続的な筋活動が確認でき、左脚筋電位が上昇して下降したのち、右脚筋電位にも同様の推移がみられることから重心移動が行われていることが推測できる。図 18 より初心者 A はわずかな筋電位しか確認できず、ほとんど両脚に負荷がかかっていないことが推測できる。また、図 19

より初心者 B は右脚に連続的な筋電位が発生していることから、右脚に連続的な負荷があることが推測できる。

映像データと照らし合わせた結果、熟練者は右脚の屈伸運動を行い上体の曲げ角度を変化させることが分かった。これはネジ締め工程時の中腰状態での負荷を軽減するために行っていると考えられる。初心者 A の動作は熟練者に近いが、熟練者より身長が 10cm ほど小さく（表 1）ほとんど中腰状態になることがないため筋電位からは負荷がほとんど観察できなかったと考えられる。一方初心者 B の身長は初心者 A と大きく変わらないが（表 1）、ネジ締め工程時は常に中腰状態であるため、負荷の大きい右脚の電位が連続して観察できたと考えられる。

6. おわりに

本研究では、複数部位に装着した筋電位センサのデータを可視化し、複数の被験者の比較を容易にする手法の提案を行った。提案手法により重筋作業における熟練者と初心者の動作の質の差の発見が容易となった。また、統計情報や主観評価の結果と可視化結果を比較し、妥当性のある結果であることを示した。今後の展望として、他重筋作業への適応性についての調査を行い、重筋作業員が使用し熟練技能の習得に役立つシステムの構築を目指したい。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 26350280 の助成による。

参考文献

- [1] 吉武 康栄, ” 生体信号処理のレシピ”, 大分看護科学研究 4(1), pp.27-32, (2003)
- [2] 杜儒霖, 加藤龍, 北佳保里, ”表面筋電位を用いた個人的疲労感の定量化”, 工学会春季大会学術講演会論文集, pp.719-720, (2008)
- [3] 伊東祐久, 大山勝, 勝田兼司, ”顔面表情筋の表面筋電図パワースペクトル分析”, 耳鼻と臨床, Vol. 27, No. 2, pp. 425-433, (1981)
- [4] 中村智史, 橋口敬司, 外山貴子, ”表面筋電位を用いた指の動き推定システムの構築”, 進学技報, CAS2005-81, (2006)
- [5] 木塚朝博, 木竜徹, 増田正, ”表面筋電図”, 東京電機大学出版局, pp.43-46, (2006)