

慣性センサ及び動画像を利用した作業姿勢計測手法の開発

栗野 晃希, 泉 巖, 中島 康博, 近藤 正一, 全 慶樹, 前田 大輔

Development of Methods for Detection of Working Postures using IMU and Video Image Processing

Koki KUWANO, Iwao IZUMI, Yasuhiro NAKAJIMA,
Shouichi KONDOU, Keiki ZEN, Daisuke MAEDA

抄 録

少子高齢化による生産年齢人口の減少から、高齢労働者の活用が重要視されているが、加齢に伴う心身機能低下による労災リスク増加の懸念がある。また、人手不足のために労働者が不慣れな作業に従事する機会も増えていることから、事業者には不安全な作業にならないよう適切な作業管理が求められている。

そこで、安全に関わる重要な要素である、作業姿勢に起因する筋骨格系の負担の把握をねらいとして、慣性センサおよび動画像を用い、作業現場での利用が容易な姿勢の計測・分析手法を開発した。

キーワード：少子高齢化，安全管理，作業姿勢

Abstract

Due to the decrease in the working-age population caused by the declining birthrate and aging population, utilization of the abilities of elder workers is becoming more important. However, there are concerns about the increasing risk of industrial accidents by the decline in physical and mental functions associated with aging. In addition, there are cases for workers to engage in unfamiliar work due to the shortage of labor, and employees are required the appropriate management to avoid unsafe work. In order to understand the musculoskeletal burden caused by working posture, which is an important factor for safety, we developed methods for measuring and analyzing posture using inertial measurement unit (IMU) and video images, which can be easily operated at work sites.

KEY-WORDS : Declining birthrate and Aging population, Safety management, Working postures

1. はじめに

日本は人口に占める高齢者（65歳以上）の割合が増加する「高齢化」と、出生率の低下により若年者人口が減少する「少子化」が同時に進行する少子高齢化社会となっている。1995年をピークに、生産年齢人口（15歳以上65歳未満）は減少に転じており、経済社会の活力を維持するためには、高年齢労働者（55歳以上）の活躍が一層重要とされている¹⁾。しかし、一般に加齢には心身機能の低下を伴う²⁾ことから、高齢労働者の雇用においては労災リスクの増加が懸念されている³⁾。令和2年における60歳以上の休業4日以上⁴⁾の労働災害死傷者数は、対平成29年度比で16.3%増の34,928人となっている⁴⁾。こうした状況に対し、ヘルメットや腕時計型のデバイスに組み込んだセンサによって、体温や心拍数を計測し、

熱中症や疲労などの体調面の安全を看視するシステムが開発されている⁵⁾。しかし、体調面以外の作業姿勢や動作など筋骨格系に起因する労働災害リスクも無視できない。実際に、「動作の反動・無理な動作」は転倒、転落に次ぐ3番目の死傷災害事由となっている⁴⁾。ここで「動作の反動・無理な動作」とは、腰を深く曲げた姿勢から重い荷物を反動をつけて持ち上げる、長時間にわたり低い姿勢をとる、荷物を持ったまま腰をひねる等の身体負担の大きな動作を指し、重量野菜の収穫、荷物の搬送、商品棚の整理といった作業に見られる。こうした動作は腰痛や捻挫の要因や労働災害になり得る。

これらの動作をはじめとして、作業中の筋骨格系への身体負担を把握し、作業工程や作業姿勢を見直すことで、労災リスク低減や身体負担軽減が期待できる⁶⁾。現在、人の姿勢や動作などの把握には様々なアプローチが提案されている。例

事業名：経常研究

課題名：作業現場の安全管理に向けた姿勢・動作簡易分析手法の開発

例えば、姿勢分析手法の一つである、モーションキャプチャと呼ばれる技術がある。ただし、この技術は詳細な動作の分析を目的としているため、全身に多数の慣性センサや計測用マーカーを装着する上に、特殊な計測環境を整えねばならず、その解析には専門的な知識や分析労力を必要とする。また、スナプリーディング法と呼ばれ、30秒や1分といった一定時間間隔で作業者の瞬間の姿勢を観察し記録する方法があるが、この方法では特別な機材は不要であるものの、作業者の姿勢を調査者が目視で特定し、姿勢に付されたコードなどを手作業で記録する必要がある、手間がかかる他、調査者の姿勢特定に対する慣れも求められる。こうしたことから、既存の技術を現場労働者の作業管理へ適用するには手間や環境整備の点から課題がある。

そこで、本研究では労働現場での活用を目指し、計測や分析の手間をかけずに、姿勢や動作の時間や回数を自動的に計測する二つの手法の開発に取組んだので報告する。一つは少数の慣性センサを用いる方法である。上述のように、全身の動作分析にセンサを用いて行う方法では、身体部位ごとに多数のセンサを装着する必要があるが、開発した手法では、作業の安全管理に必要とされる姿勢や動作の種類を限定することで、センサ数を低減できた。もう一つは、一般的なビデオカメラで作業者を撮影した動画像にを用い、機械学習を適用することで姿勢や動作の推定を可能とする手法である。

2. 計測対象とする姿勢と動作の定義

一般に、姿勢とは体位と構えの2つに区分される⁷⁾。体位は身体の重力方向に対する位置関係で、立位、座位、臥位の3つ、構えは頭部、体幹（腰より上の部分）、四肢各部の位置関係を指す。これらの位置関係の組合せにより、人の姿勢は膨大な数となる。本研究は、労働現場の作業姿勢を手間や分析コストをかけずに計測することを目的としているため、代表的な姿勢を再定義することとした。ここで、労働時の作業姿勢の評価法の一つである、長町らによって開発された「つらさ指数」⁸⁾を参考にした（図1）。この指数は、身体の力学モデル、筋電図、心拍数、エネルギー代謝率、主観的なつらさを総合し、代表的な姿勢について、身体負担を1から10の数値で表している。通常、前述のスナプリーディング法で活用し、身体負担面における作業の特徴、負担の大きさや各姿勢の発生頻度を把握する目的で用いられる。この評価法は、身体負担に影響する体幹の姿勢変化と下肢（膝）の屈伸に着目していることに特徴がある。このことを利用し、腰の前屈角度と膝の屈曲角度によって、代表的な姿勢を定義できると考えた。

図2に横軸を膝の屈伸角度、縦軸を腰の前屈角度に設定し、姿勢（No.1～No.9）の範囲を示す。右上にはつらさ指数が10の「膝を深く曲げた中腰で上体を前屈」など身体負担の

No.	つらさ指数	姿勢	動作内容	具体例
9	10		膝を深く曲げた中腰で上体を前屈	かかとが浮いている（水泳のスタート直前の格好）
8	6		膝を伸ばした中腰で上体を深く前屈	90度以上この姿勢で膝が曲っていても同じ
7	6		膝を曲げた中腰で上体を前屈	45～90度（腰） 0～45度（膝）
6	5		膝を伸ばした中腰で上体を前屈	45～90度 足に障害物があっても同じ
5	5		しゃがんだ姿勢（かかとがついている）	かかとが浮くと膝前に出る——区分(J)
4	5		膝を伸ばし上体を軽く前屈	30～45度 無理な姿勢に見えたら——区分(G)
3	4		膝を軽く曲げ上体を軽く前屈	0～50度 立ち姿勢で軽く膝が当たる
2	3		立ち姿勢で背伸び（かかとが浮いている）	目より高い物を取る格好
1	1		立ち姿勢	0～30度 背筋が伸びている

図1 つらさ指数⁸⁾
（長町三生ほか共著、「現代の人間工学」, 朝倉書店, pp.153より引用）

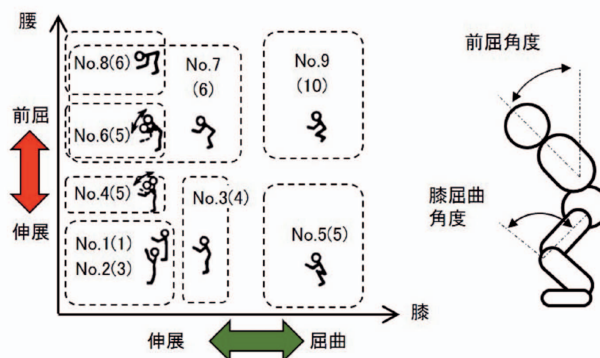


図2 前屈角度と膝の屈曲角度による姿勢の分布（括弧内は、つらさ指数）

大きな姿勢、左上には同6の「膝を伸ばした中腰で上体を深く前屈」など身体負担が中程度の姿勢、右下には同5の身体負担が中程度の「しゃがんだ姿勢」、左下には同1の「立ち姿勢」などの身体負担が小さい姿勢が分布することになる。このことから、それぞれの姿勢を膝の屈曲角度と腰の前屈角度によって特徴付けられることがわかる。ここで、つらさ指数における具体例を参考に、前屈角度を45°として、腰の屈曲と伸展を区分した。また、膝の屈曲については、膝を曲げたNo.7のつらさ指数6の姿勢では、屈曲角度を0～45°としているが、No.9は特につらさ指数が10の姿勢、No.5はしゃがんだ姿勢で、これらは膝を「深く」屈曲している状態であることから、本研究においては、膝の屈曲と伸展の基準を90°として区分した。こうした基準に基づき、以下の4つの代表的な姿勢を定義できた（図3）。

- 姿勢1：立位
- 姿勢2：膝屈曲
- 姿勢3：前屈
- 姿勢4：膝屈曲・前屈

また、身体の動作とは仕事や課題を遂行する身体行動や、保持姿勢の連鎖の全体を指す場合があるが⁹⁾、本研究においては、今後、上記で定義した各姿勢から他の姿勢に移行することを動作と呼ぶこととする。

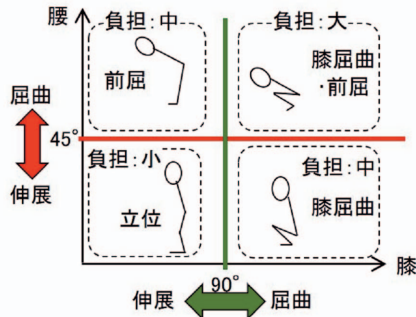


図3 定義した4つの姿勢

3. 姿勢の計測手法

定義した4つの姿勢を、慣性センサおよび動画像を用いて計測する手法について検討した。

3.1 慣性センサを用いた姿勢の計測手法

一般に市販されている慣性センサは3軸加速度と3軸角速度の6軸の時系列データを計測可能である。さらに3軸の地磁気成分や気圧も計測可能としたタイプも販売されている。図4に今回利用した慣性センサ(TSND151, ATR-Promotions製)を示す。計測対象とする姿勢は膝の屈曲角度と腰の前屈角度で区分しているため、それぞれの角度を取得し、その組合せで場合分けすれば、定義した姿勢の検出が可能である。しかし、この方法では少なくとも2個の慣性センサを用意し、体



図4 計測に用いた慣性センサ (TSND151, ATR-Promotions製)

幹の背部あるいは胸部、さらに下肢の計2箇所に装着しなければならぬため、作業現場での活用を考えると計測の手間や作業の妨げの原因となる。そこで、身体背部に装着した1個のセンサから取得できる時系列データのみで姿勢を計測する手法を考案した。また、考案した手法により、データから自動的に4つの姿勢を検出するプログラムを作成した。

図5は本手法における、前屈と膝の屈曲角度の計測方法を示す概略図である。まず、身体背部に装着したセンサの3軸角速度情報を積分することで、前屈角度を得ることができる。しかし、一般に慣性センサデータには温度ドリフト等のノイズ成分が含まれるため、積分を継続すると、角度が真値からずれてしまう現象が起こる。そのため、角速度と同時に取得できる重力加速度の3軸方向成分を複合する、一般に相補フィルタと呼ばれる補正技術を用い、鉛直方向に対するセンサの傾きを求め、腰の前屈角度を推定した。しかし、これだけではセンサを装着していない膝の屈曲角度は直接計測できない。そこで、膝を屈曲、伸展すると、体幹に装着したセンサも鉛直方向に変位することに着目した。一定以上の鉛直方向の変位が発生した場合に膝の屈曲、あるいは伸展と判別できる。ここで設定する変位の閾値については、例えば農作業や工場内での荷役を考えた場合、深いしゃがみの姿勢が起こり得ることから、この姿勢を計測できる値を設定することとした。今回は、(社)人間生活工学研究センター発行の「日本人の人体計測データ」(1992-1994)から、成人の座位と立位による体幹の高度差がおよそ身長22%であることを基準とした。身

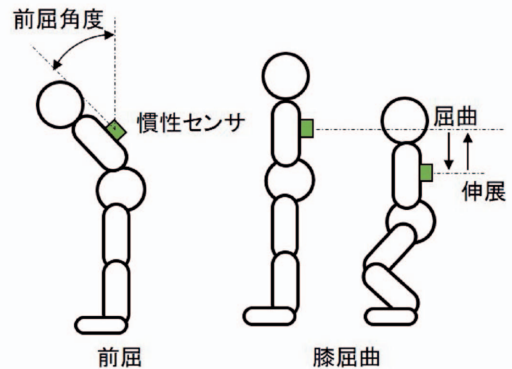


図5 腰の前屈と膝の屈曲の計測

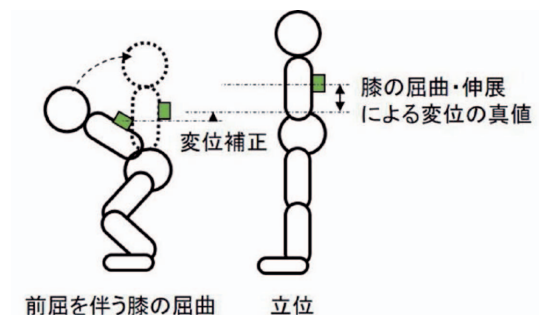


図6 腰の前屈を伴う膝の屈曲の計測

長との比をパラメータとすることで、計測対象とする作業者ごとに値を設定することが不要となる。さらに、前屈を伴った膝の屈曲については、図6に示すように前屈角度を用いて変位を補正することで、膝の屈曲、伸展を判別可能にした。

3.2 動画像を用いた姿勢の計測手法

動画像を用いた機械学習によって身体各部位の3次元位置を推定し、部位間の角度から姿勢を特定するアルゴリズムを開発した。ここでは、単眼のカメラ映像のみから関節点の3次元位置を推定する手法¹⁰⁾の適用を検討した。手法の詳細は引用文献に委ね、ここでは概略を述べる。図7の最左列に示す、ビデオカメラ（GZ-E765、(株)JVCケンウッド製）で撮影した動画像を構成する2次元画像を用いて、フレーム毎に機械学習による特徴点抽出手法を適用し、作業者の体幹や四肢などの身体部位の関節点の画像上での位置を推定する。次に、対象となるフレームとその前後数フレームの画像上での関節点の位置を利用した機械学習を行うことで、時間的な関節位置の変動情報を利用して関節点の3次元位置を推定する。推定した関節点を連結することで、下肢や上肢、体幹などの身体部位と、その配向がわかることから、この解析結果により、前屈角度、膝屈曲角度を取得した（図8）。前屈は図3に示

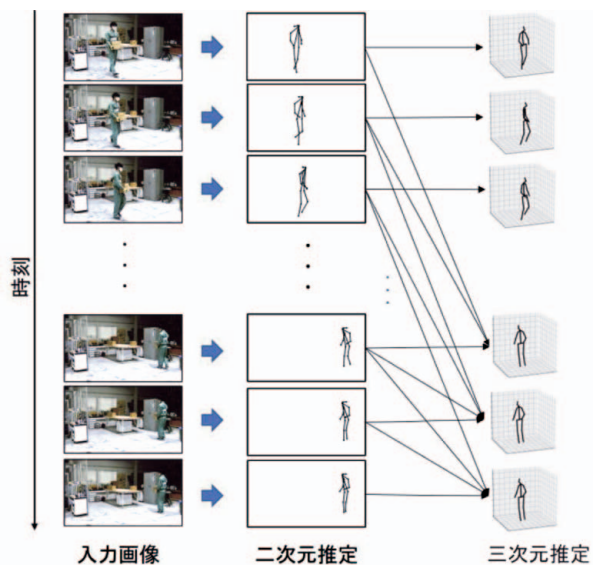


図7 動画像からの身体部位推定

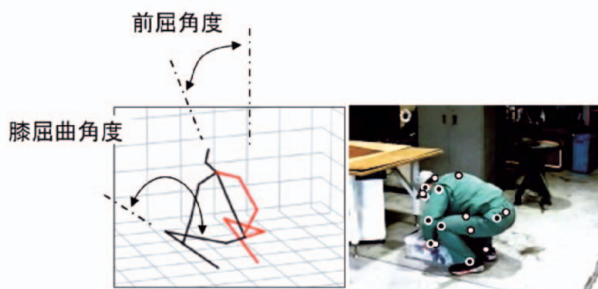


図8 腰の前屈と膝の屈曲の計測

すように慣性センサと同様の45°以上の角度とし、膝の屈曲角度については90°を判定基準とした。

4. 荷役作業の模擬実験と結果

4.1 実験の手順と条件

身体的作業負荷の大きい現場を想定し、図9に示す荷役作業の模擬試験を実施し、慣性センサおよび動画像を用いた計測手法により、4姿勢の検出を行った。なお、事前に実験参加者に、荷下ろし時の姿勢を以下のように指示した。

- 1回目：前屈
- 2回目：膝屈曲・前屈
- 3回目：膝屈曲

また、荷下ろし時の姿勢確認のため、検証用として身体側面を撮影するビデオカメラを設置した。検証には動画から静止画を抽出し、画像上で前屈角度や膝の屈曲角度を取得し、姿勢の確認に利用した。

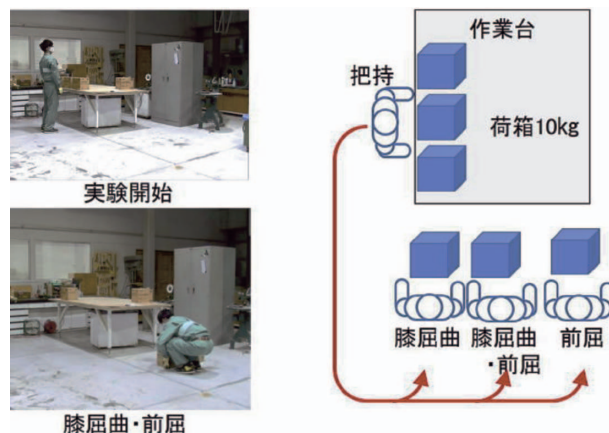


図9 模擬実験の概略図

4.2 実験結果

図10に慣性センサを用い、3.1で述べた手法によって取得した腰の前屈角度と膝の屈曲・進展に伴う変位を示す。図中には前屈の検出閾値45°及び膝の屈曲の検出閾値である身長比0.22（22%）を表示している。図11に動画像を用い、3.2で述べた手法によって得た腰の前屈角度と膝の屈曲角度の変化を示す。また、それぞれの検出閾値角度45°、90°を図示している。図12に、これら2つの手法と、検証用のビデオ画像から取得した姿勢検出結果を示す。両手法とも、姿勢確認用のビデオカメラ画像の姿勢検出結果とほぼ一致していることが確認できた。表1は各姿勢の保持時間を示しており、検証画像との時間差は-0.08秒から+0.19秒であった。動作については、立位から、荷下ろし時に指定した3姿勢へ、また、それらの姿勢から立位に移行する動作についても、判定する

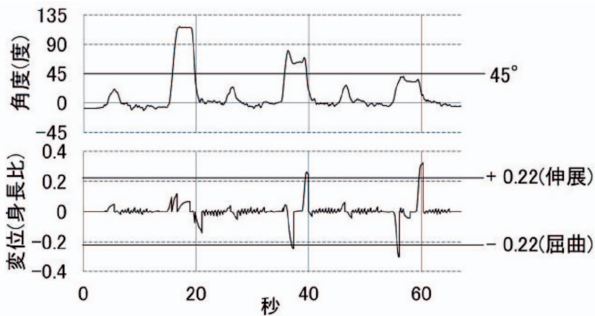


図10 慣性センサにより取得した前屈角度（上段）と膝屈曲・伸展による変位（下段）

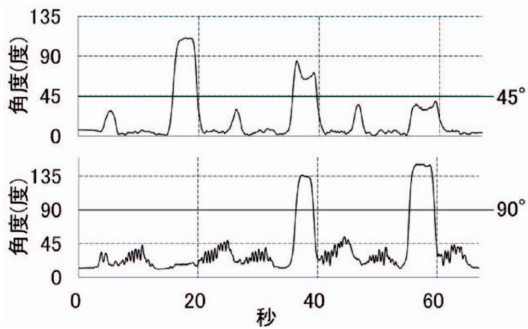


図11 動画像により取得した前屈角度（上段）と膝屈曲・伸展角度（下段）

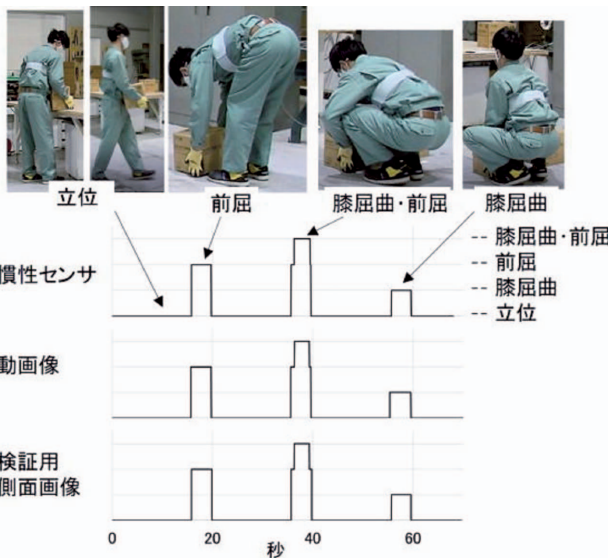


図12 4姿勢の計測結果

ことができ、姿勢確認用の画像と同様の変化を確認した。

5. 考 察

荷役作業の模擬実験結果について、慣性センサ、動画像による計測結果は検証用画像から取得した姿勢変化とはほぼ一致している（図12）。表1に示した姿勢の保持時間には誤差が発生しているが、これは本研究で目的とする、簡易的に身体

リスクを把握する分析手法においては問題にならない値であり、一定の精度が得られたと考える。このことについては、今後、実際の作業現場で本手法を導入し活用する場合、まず各姿勢の有無や発生頻度を把握することが重要と考えられることから妥当な判断と言える。

表1 各手法による姿勢の維持時間比較

	確認用側面画像	慣性センサ	動画像
前屈	4.00	3.92 (誤差 -0.08)	4.03 (誤差 +0.03)
膝屈曲・前屈	2.98	3.06 (誤差 +0.08)	2.90 (誤差 -0.08)
膝屈曲	3.88	3.92 (誤差 +0.04)	4.07 (誤差 +0.19)

表2 各手法の特徴

	計測範囲	多人数計測	全身計測	暗所計測
慣性センサ	○	△ 人数分のセンサが必要	△ 多数センサの装着が必要	○
動画像	△ 遮蔽物・画角	○	○	× 照明が必要

ここで、慣性センサ及び動画像を用いた姿勢推定における特徴を表2に示す。動画像による手法では、画角内に対象となる作業者を捉え続けることが条件となる。また、撮影される作業者の心的ストレスや遮蔽物の出現、カメラを配置する適当なスペースが確保できないなど、想定外の状況が起り得ることに注意を払う必要がある。こうした場合においては、慣性センサによる計測手法が適していると考えられる。一方、本研究の応用展開として、前屈、膝の屈伸以外の、例えば上肢の運動や腰のひねり動作などを計測する場合、身体各部分に慣性センサを装着することなく、全身を計測可能な動画像の利用が適していると考えられる。以上のことから、対象とする作業環境、内容に応じて手法を選択することも考慮し労働現場での活用を図る。

6. まとめ

作業現場での安全管理に向け、4つの作業姿勢および動作を、慣性センサおよび動画像を用いて計測する手法を開発した。慣性センサによる手法では、身体背部に装着した一つのセンサで計測可能であることを確認した。また、一般に市販されているビデオカメラで撮影した動画像を用い、機械学習によって身体各部位の3次元位置を推定し、同様に姿勢、動作を取得できることを確認した。

参考文献

- 1) 「高年齢者雇用安定法改正の概要」(厚生労働省)
<https://www.mhlw.go.jp/content/11600000/000694689.pdf>
- 2) 齊藤 一：向老者の機能の特性-停年制問題を背景に考
えて，労働の科学，vol.22, No.1, pp.4-9 (1967)
- 3) 「高年齢労働者の活躍促進のための安全衛生対策」(中央
労働災害防止協会) (2017)
- 4) 「令和2年の労働災害発生状況」(厚生労働省)
<https://www.mhlw.go.jp/content/11302000/000790380.pdf>
- 5) 丸山 崇：熱中症予防対策におけるウェアラブルセンサー
の活用と効果的な熱中症予防法の検証，労災疾病臨床研
究事業費補助金 (2019)
- 6) 中央労働災害防止協会：エイジアクション100, pp.9
(2018)
https://www.jisha.or.jp/age-friendly/pdf/ageaction100_gaiyou.pdf
- 7) 藤澤宏幸：姿勢の定義と分類の再考，理学療法の歩み，
vol.24, No.1, pp.31 (2013)
- 8) 長町三生ほか著：『現代の人間工学』，朝倉書店，pp.153
(1986)
- 9) 長崎 浩：動作分析のこれから，理学療法科学，vol.13,
No.3, pp.147-151 (2003)
- 10) 3D human pose estimation in video with temporal
convolutions and semi-supervised training: Proceedings
of the IEEE Conference on Computer Vision and
Pattern Recognition. 2019.