

博士論文

肩関節動作の評価を目的とした
上肢用光学式モーションキャプチャの開発

Development of an optical motion capture for upper
limb to evaluate shoulder joint motion

2019年3月

東京電機大学大学院 先端科学技術研究科

13UDQ03

高見 響

Graduate School of Advanced Science and Technology,
Tokyo Denki University

Hibiki Takami

研究概要

光学式モーションキャプチャを用いた動作解析は、リハビリテーション分野やバイオメカニクス分野などで幅広く活用されており、義肢装具の評価においては、下肢を中心とした歩行への活用実績に富むが、上肢の動作評価への使用実績はまだ多くない。義手の訓練でのフィードバックは、作業療法士の経験や技量に依存するところが多く、動作の共有は、ビデオカメラを用いている。ただし、視点が固定される撮影画像よりも、光学式モーションキャプチャを用いた定量的な計測で、任意の方向からアニメーションで再生し観察するほうが動きは理解しやすい。しかし、臨床現場に導入するにあたって、コストや時間の制約、そして運動学データの欠落が問題となる。本論文では、上肢動作計測に最適な計測環境最適化を目的として、計測精度に影響を与える要因を「骨とマーカ間の誤差要因」、「マーカとカメラ間の誤差要因」の2つの要因に分類し、それぞれの要因で実験を行った。計測対象である上肢動作は、粗大動作と机上動作の2つの動作に分類し、それぞれに最適なカメラ位置・高さを提案する。「骨とマーカ間の誤差要因」では、皮膚上とコンプレッションウェア上に設置したマーカの変位と肩甲骨角度の特徴を確認した。「マーカとカメラ間の誤差要因」では、粗大動作と机上動作のマーカ認識の違いについて検証した。粗大動作では、パラメータ設計を用いて従来の測定条件と提案した測定条件を比較した。机上動作では、STEFを用いて従来の測定条件と提案した測定条件の比較した。実験結果から、粗大動作、机上動作ともに従来の測定条件より提案した測定条件で、マーカの欠損が少なく測定可能な動作が増加した。

Abstract

The movement analysis using the optical motion capture is utilized widely, especially in the field of rehabilitation and biomechanics. The evaluation of prosthesis and orthosis is rich of cases where gait and body balance is targeted. In these cases lower limbs are evaluated and rarely the movement of upper limb and upper limb prosthesis. Therapy for upper limb is no less important for upper limb amputee, yet feedback in the therapy of upper limb prosthesis often depends on experience and skills of occupational therapists. In these cases, video is mainly used for sharing objective information. However, video is limited to the 2D properties at shooting and it is easier to understand the motion by reproducing them by animation from an arbitrary observation direction. In such case, quantitative measurement using the optical motion capture is the solution. The difficulty at introducing motion capture system to the clinical site, are constraints on cost, preparation, recording timing, analysis time, and failure of kinematic data collection. The last matter are caused by the relation camera – marker – body dimension – body motion. This can be reduced by the knowledge of the task and experimental data base. The objective of this research is to optimizing the measurement environment for upper limb movement measurement, by testing factors that affect measurement accuracy. These are classified into two factors, error factor between bone and markers and error factor between markers and cameras. Experiments are conducted for each factor. The upper limb motion to be measured is classified into two motions gross arm movement and desk top positioning. We propose optimal camera position and height for each. To the cause of error factor between bone and markers, the displacement of the marker placed on the skin and the compression wear the characteristics of the scapula position

and orientation in relation to the skin and wear were confirmed. For error factor between markers and camera, we examined the difference between gross movement and desk top positioning marker tracking. In gross movement, the conventional measurement condition and the proposed measurement condition were compared using parameter design. In desk top positioning, Simple Test for Evaluating Hand Function: STEF was used to compare the conventional measurement conditions with the proposed measurement conditions. Experimental results show that both the gross movement and the desk top positioning were measured under the measurement conditions proposed by the conventional measurement conditions, the marker defects were small and the measurable operation increased.

目次

第1章 序論

1-1 研究背景	2
1-2 研究目的	4
1-3 論文構成	5

第2章 モーションキャプチャ

2-1 モーションキャプチャの種類	7
2-2 光学式モーションキャプチャの計測原理	9
2-3 VENUS 3D システム	10
2-4 実験で用いる VENUS 3D の設定	12
2-4-1 カメラ距離	12
2-4-2 カメラ位置	14
2-4-3 マーカ位置	17
2-4-4 座標系の設定	22
2-4-5 データ処理	24

第3章 骨とマーカ間の誤差要因

3-1 概要	27
3-2 目的	28
3-3 方法	29
3-4 結果・考察	32
3-5 第3章のまとめ	42

第4章 マーカとカメラ間の誤差要因

4-1 概要	44
4-2 目的	45
4-3 方法	46
4-4 結果・考察	48
4-5 第4章のまとめ	67

第5章 粗大動作時のカメラ配置の検証

5-1	概要	69
5-2	目的	69
5-3	直交表実験	70
5-4	方法	71
5-5	結果・考察	77
5-6	確認実験	80
5-7	第5章のまとめ	83

第6章 机上動作時のカメラ配置の検証

6-1	概要	85
6-2	目的	85
6-3	方法	86
6-4	結果・考察	88
6-5	第6章のまとめ	90

第7章 結論

参考文献	94
謝辞	98
付録	

第 1 章

序論

1-1 研究背景

光学式モーションキャプチャを用いた動作解析は、リハビリテーション分野やバイオメカニクス分野などで幅広く活用されるに至っている。光学式モーションキャプチャを用いた義肢装具の評価においては、フォースプレートと組み合わせ、下肢切断者の義足歩行⁽¹⁾や片麻痺者の下肢装具歩行⁽²⁾など下肢を中心とした歩行の動力学解析への活用実績に富む。これに対し、上肢の動作評価への活用は、義手使用者と非切断者の動作比較による代償動作解析⁽³⁾や、筋電義手と能動義手の使用時の動作比較⁽⁴⁾の例はあるが、限られた研究機関での実績に限られ、臨床での使用実績はまだ多くない。肩関節外転等の代償動作は義手の掌背屈等の手関節機能の欠如のため手先具の位置姿勢を定めるために誘引され、長期間の代償動作が肩こりや腰痛等の二次障害につながることを確認されている⁽⁵⁾。しかしながら、機序については定量的な調査はまだなく、代償動作の抑制には義手の操作訓練、基本操作訓練から日常生活訓練において、作業療法士による動作の観察、評価、指導が動作改善のキー⁽⁶⁾となるが、評価ポイントが義手の誤動作や動作のタイミング⁽⁷⁾、肩関節の外転・内旋位による不自然な姿勢⁽³⁾など多岐に渡り、被訓練者へのフィードバックは、作業療法士の経験や技量に依存するところが多くなる。さらに、動作の評価を訓練者や他の被訓練者と共有する場合、ビデオカメラを用いて撮影した画像が有効である。ただし、視点がカメラの位置に固定される。これに対し、光学式モーションキャプチャを用いて体表面に取り付けた赤外線反射マーカ(以後、マーカ)の位置や、それらから算出した関節角度などの定量的な計測を行い、コンピュータグラフィックスを用いて任意の方向からアニメーションで再生し観察するほうが動きは理解しやすさは大きく向上し、また VR 技術と組み合わせることで訓練時の履歴や目標を提示し、運動学習の効果をさらに向上できると期待できる。

臨床現場に光学式モーションキャプチャを導入するにあたってはコスト(装置価格、カメラ、マーカ準備時間)、測定対象が測定失敗とやり直しが許容されないこと、そして上肢動作特有の上腕内外旋、前腕回内外によるマーカの見失い、画面上での重なりが原因による運動学データの欠落がある。上肢と下肢とでは、測定空間や対象動作が異なり、作業療法では用いる道具や環境の制約から、カメラやマーカの設定を下肢と同じにすることはできない。このため、マーカの見失い等の課題に対する対策として、マーカの空間的な連続性と、時間的な連続性を制約条件として用いて計算により見失ったマーカ位置を算出する方法がある。前者は直線、3次関数、スプライン関数を用いて補う方法がある⁽⁸⁻¹⁰⁾。後者には、マーカ間に解剖学的な位置関係情報を付加した剛体モデル、仮想点を導入する方法がある。マーカの運動学データから関節角度や動作速度を算出するにあたり、上記の方法は測定失敗とやり直しを避けるには効果的であるも

の、上肢においては、前腕の回内外動作や手指の小さな動き、ならびに多自由度で可動領域の大きな肩関節においては、マーカの位置の不確かさは、関節角度の計算結果の不確かさに多大な影響を及ぼす。肩関節は複数の体節から構成され、関節角度変動に伴い周囲の筋による体表面の膨隆が顕著で、マーカが体節に対し初期状態で取り付けた位置を保てない場合、算出される関節角度を比較するのに影響がないとは言い難い。マーカの見失いや重なりによるマーカの運動学データが欠落する問題の根本的な解決には、測定対象の上肢動作において、最低限数のカメラにて体節に取り付けたマーカを捕捉しつづけられるカメラのレイアウト条件を求めることである。動作計測時のカメラ位置を測定空間内に均等に設置し⁽¹¹⁾、経験に基づき試行錯誤で調整を行うことが提案されているが、これが上肢の運動に対しどの程度有効かを定量的に比較した報告はなく検証が望まれる。

1-2 研究目的

本研究では、肩関節動作の評価を目的とした上肢用光学式モーションキャプチャの開発を行う。光学式モーションキャプチャを用いた計測では、体表面に赤外線反射マーカを設置し、カメラから出る赤外線がマーカが反射させ、反射した赤外線を2台以上のカメラで捉えることで体表面に設置したマーカの3次元座標などを測定できる。それらから算出した関節角度などを用いることで、計測時の動きを3次元に再現することが可能となる。しかし、このとき再現される動きはあくまでもマーカの3次元座標などから算出した動きであって、計測時の人の動き自体を直接再現しているわけではない。そのため、設置しているマーカが体表面の動きと異なる動きやマーカ自体がカメラの画面上から消えた場合、計測時の動きを正確に再現できなくなる。また、マーカに問題が生じなくても、計測する動きによってマーカがカメラから隠れる場合もある。その場合も計測時の動きを正確に再現できなくなる。これらの問題が生じず、マーカをいかに精度良く計測し続けることができるかが、光学式モーションキャプチャの計測では重要となってくる。

そこで、上肢動作計測時の計測精度に影響を与える要因の抽出を行った。図 1-1 は光学式モーションキャプチャによる動作計測から関節角度データ算出までの流れと計測に影響を与える要因を示したものである。動作をしてマーカが変位するまでの間に考えられる要因として、皮膚の伸縮による動きや服の上からマーカを設置したときの動きが考えられる。次にマーカの変位から光学式モーションキャプチャがマーカを捉えるまでの間に考えられる要因として、マーカがカメラから隠れることが考えられる。動作をしてマーカが変位するまでの間に考えられる要因を「骨とマーカ間の誤差要因」、マーカの変位から光学式モーションキャプチャがマーカを捉えるまでの間に考えられる要因を「マーカとカメラ間の誤差要因」の2つの要因に分類して計測環境の最適化を検証した。

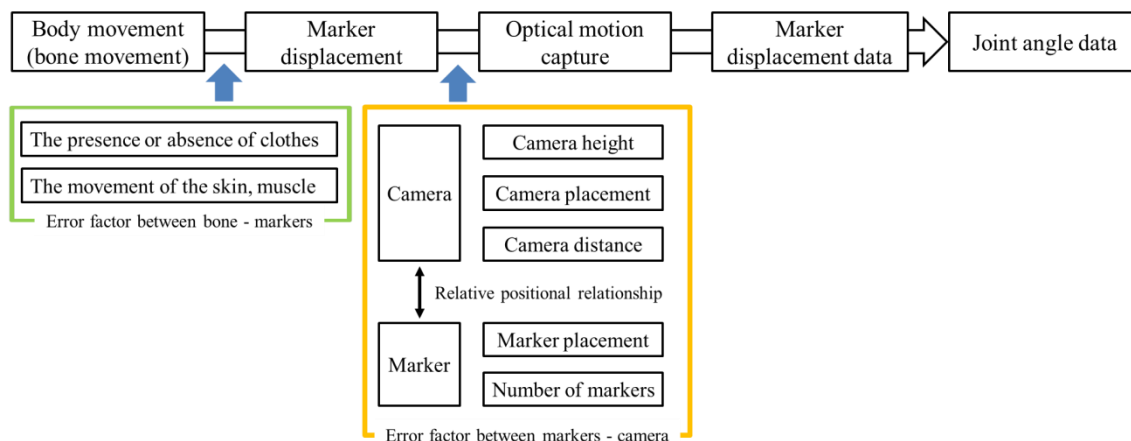


図 1-1 光学式モーションキャプチャによる計測処理の流れと計測精度に影響を与える要因の関係

1-3 論文構成

本章では，研究背景と研究目的について述べた．

続く，第 2 章では，モーションキャプチャの種類や光学式モーションキャプチャの計測原理，各章で使用するモーションキャプチャの設定について述べる

第 3 章では，骨とマーカ間の誤差要因としてコンプレッションウェア着衣・非着衣でのマーカ変位と肩甲骨角度の比較について述べる．

第 4 章では，マーカとカメラ間の誤差要因としてカメラの位置・高さを変更し，粗大動作と机上動作を測定したときの捕捉できるマーカの違いについて述べる．

第 5 章では，第 4 章で測定した粗大動作での結果から，粗大動作における最適なカメラ位置・高さを検証した結果について述べる．

第 6 章では，第 4 章で測定した机上動作での結果から，机上動作における最適なカメラ位置・高さを STEF を用いて検証した結果について述べる．

最後に，第 7 章では，本論文の結論を述べる．

第2章

モーショントラッキング

2-1 モーションキャプチャの種類

モーションキャプチャとは、3次元空間内の身体各部や物の位置を時系列データとして計測できる機器である。マーカやセンサの種類によって計測方法が異なり、1)ビデオ式、2)機械式、3)磁気式、4)慣性センサ式、5)光学式がある。それぞれの特徴を述べる。

1) ビデオ式

ビデオ式は、ビデオカメラなどで撮影した映像から、頭部、体幹、手部などを検出・識別して姿勢を推定する方法である⁽¹²⁻¹⁴⁾。利点として、安価で手軽に計測できるが、欠点としては、空間の運動を平面に投影して計測するため、関節角度はカメラが運動する平面に直角に配置されていなければ正確さがないことである。

2) 機械式

機械式は、ゴニオメータとも呼ばれる。頭部や上肢、下肢にセンサを設置し、センサ同士を身体各関節を跨いでつなぐことで、関節角度を計測する方法である⁽¹⁵⁻¹⁷⁾。利点として、比較的安価で、身体に計測機を設置するため、計測精度は高いが、欠点としては、身体に計測機を設置するため、動作に大きな制限が生じることである。

3) 磁気式

磁気式は、計測空間に磁場を発生させ、身体に設置した磁気センサとの差分を計測する方法である⁽¹⁸⁻²⁰⁾。利点は、比較的安価で、磁気センサが目視できなくても磁束が身体を透過するため計測可能であるが、欠点として、金属や電気製品が近くにあると磁場が影響を受けることである。

4) 慣性センサ式

慣性センサ式は、ジャイロセンサと加速度センサを組み合わせたセンサで、得られた角速度と加速度の情報から座標を計算する方法である⁽²¹⁻²³⁾。利点は、身体に設置したセンサ自身の情報を記録しているため、目視できなくても計測可能であるが、欠点として、平行移動や速い動作、接触によって加速度や重力の影響を受けることである。

5) 光学式

光学式は、計測空間に設置したカメラの赤外線発行素子から照射される赤外線、身体表面に設置した赤外線反射マーカが反射し、2台以上のカメラで撮像

し、マーカの3次元座標を取得することで計測する方法である⁽²⁴⁻²⁶⁾。利点は、計測精度が高いこと、マーカを設置した部分の動きを立体的に計測可能なこと、被験者への身体的な拘束が少なく負担が少ないことである。欠点は、使用するカメラ台数に応じてコストが上がること、身体に設置したマーカが物や動作で隠れてデータに欠損が生じることである。

2-2 光学式モーショキャプチャの計測原理

光学式モーショキャプチャでは、三角測量の原理に基づいた DLT(Direct Linear Transformation)法を用いて計測を行っている⁽²⁷⁾。DLT 法とはカメラ位置が既知な状態で複数のカメラを使用して多方面から撮影したマーカの位置を 3 次元座標で算出する方法である。これは、1 つのマーカを点として 3 次元で位置座標を導出するには同機した最低 2 台のカメラのフレーム画像が必要であるということである(図 2-1)。

マーカの 3 次元座標を取得するためには、事前に計測空間内にあるカメラの位置関係を記録する必要がある、これをキャリブレーションと呼ぶ。キャリブレーションによりカメラの位置関係が決定することで、マーカの 3 次元座標が取得可能となる。

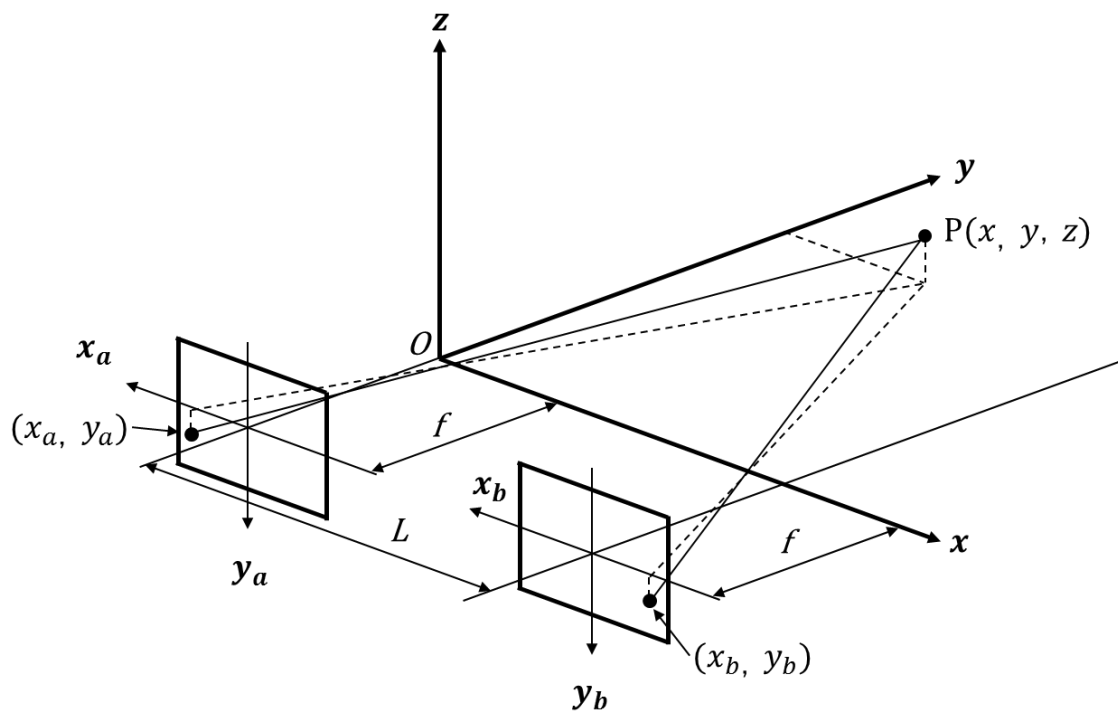


図 2-1 光学式モーショキャプチャの原理

2-3 VENUS 3D システム

本研究では光学式モーションキャプチャの赤外線カメラに、ノビテック社製の OptiTrack Flex13 を使用する(図 2-2)。カメラの主な仕様は表 2-1 の通りである。赤外線反射マーカは、図 2-3 の直径 9.5mm、ベース 18mm の球状マーカを使用する。マーカは、皮膚に直接両面テープにて貼り付ける。システムの概要を図 2-4 に示す。

計測には、計測ソフトウェア Motive(ver.1.10.3.5)によりマーカの 3 次元座標を取得し、VENUS 3D R(ver.5.3.1)にて解析を行う。



図 2-2 OptiTrack Flex13

表 2-1 OptiTrack Flex13 の仕様

Sampling period (Hz)	30 - 120
Resolution	130 megapixel (1280×1024)
Size (W×H×D mm)	53.8×81×42.4
Weight (g)	187
LED number	28
LED wavelength (nm)	850
Shortest exposure (μs)	20
Lens angle of field (deg)	56



図 2-3 赤外線反射マーカ

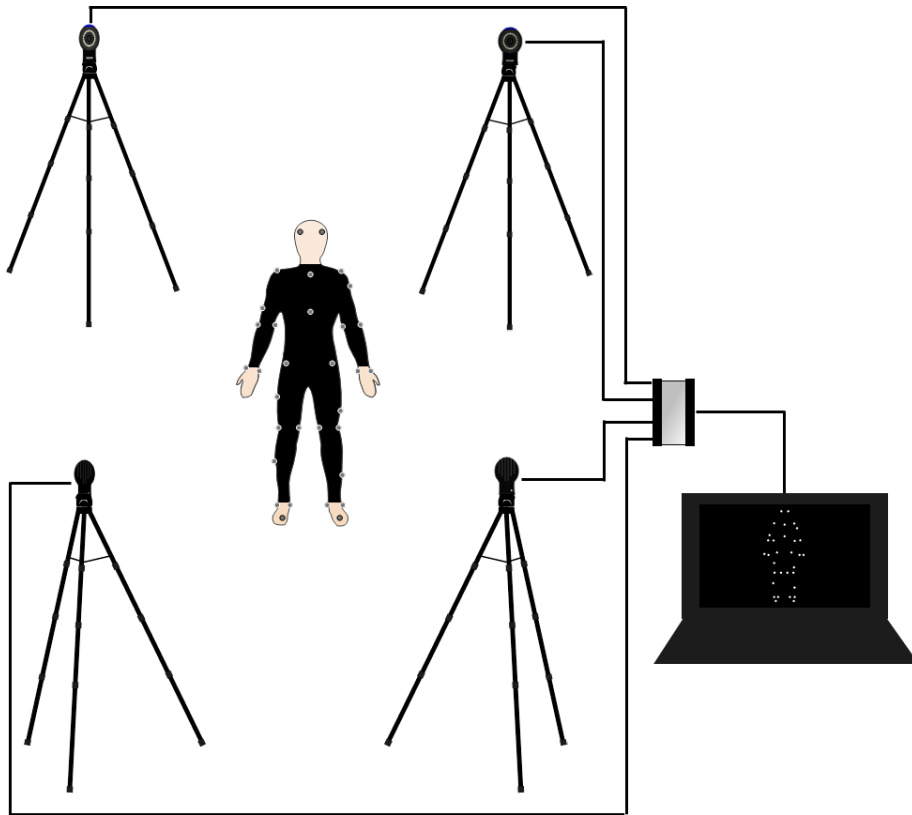


図 2-4 システム概要

2-4 実験で用いる VENUS 3D の設定

2-4-1 カメラ距離

計測に使用する OptiTrack Flex13 の計測可能距離は最大 6m であるが、被験者とカメラとの適切な距離を決定するために、カメラの空間を撮影できるのかを計測する。計測方法は、図 2-5 のように壁から一定の距離を置いてカメラを設置し、パソコン上の画面で確認できる四隅と中心にマーカを設置する。設置したマーカ間の距離を計測する。これを壁から 0.50m から 2.50m まで 0.50m ごとにカメラを移動し、5 条件で計測を行った。計測は各条件 1 試行とする。

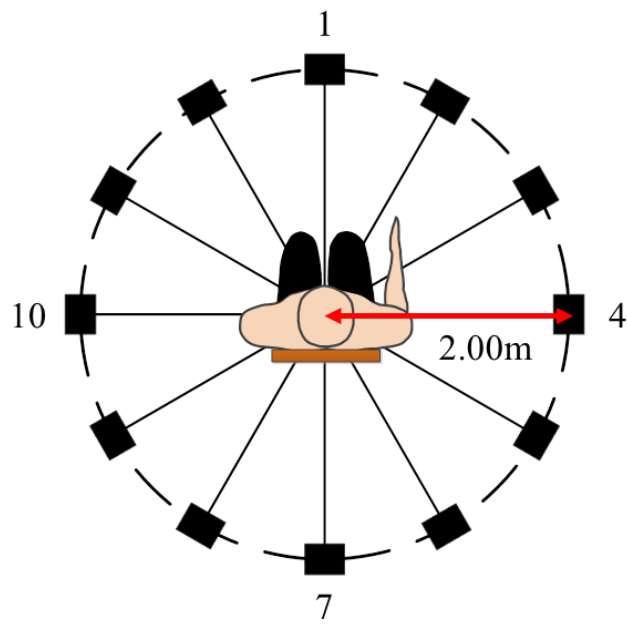


図 2-5 測定方法

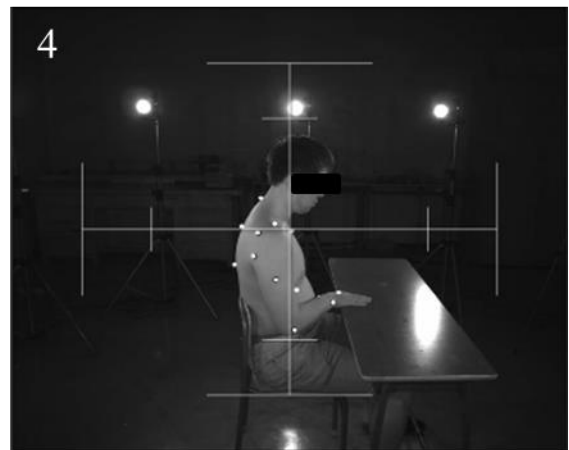
結果を、表 2-2 に示す。本研究では座位時の被験者の粗大動作・机上動作を撮影するため、図 2-5 のように動作計測時にカメラの撮影画像フレーム内に身体全体が収まる必要がある。そのため、カメラのフレームに身体全体が入る距離の中で最少の 2.00m をカメラの距離として決定した。

表 2-2 OptiTrack Flex13 の撮影範囲

壁からの距離 (m)	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
縦 (m)	0.42	0.87	1.31	1.77	2.20
横 (m)	0.53	1.07	1.63	2.18	2.73



(a) カメラ位置



(b) 各カメラ位置からの撮影画像

図 2-6 撮影画像例

2-4-2 カメラ位置

コンプレッションウェア着衣・非着衣時の肩甲骨上のマーカ変位と肩甲骨角度を測定するためのカメラ位置は、図 2-7 の通りカメラ①は被験者から 1.23m で高さ 1.12m, カメラ②は被験者から 1.24m で高さ 1.47m, カメラ③は被験者から 1.28m で高さ 1.03m とする.

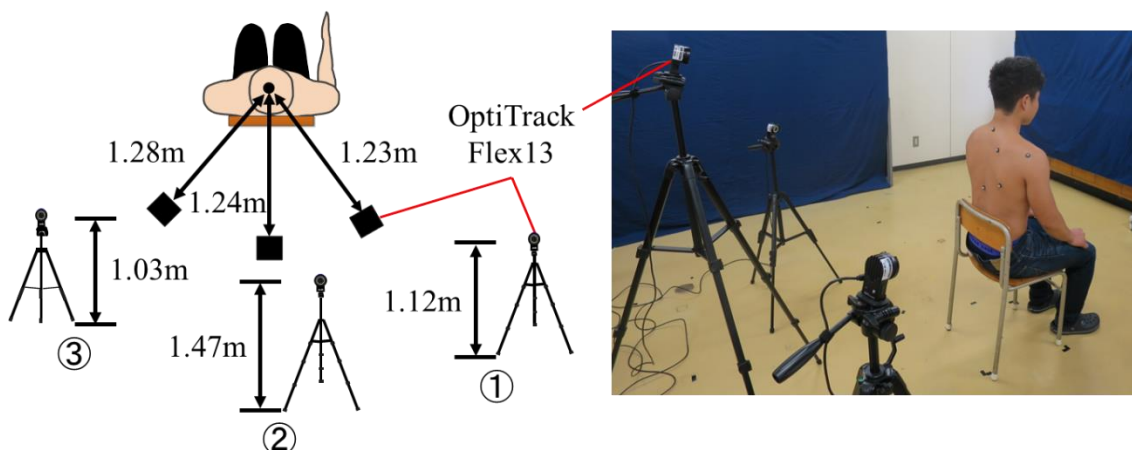
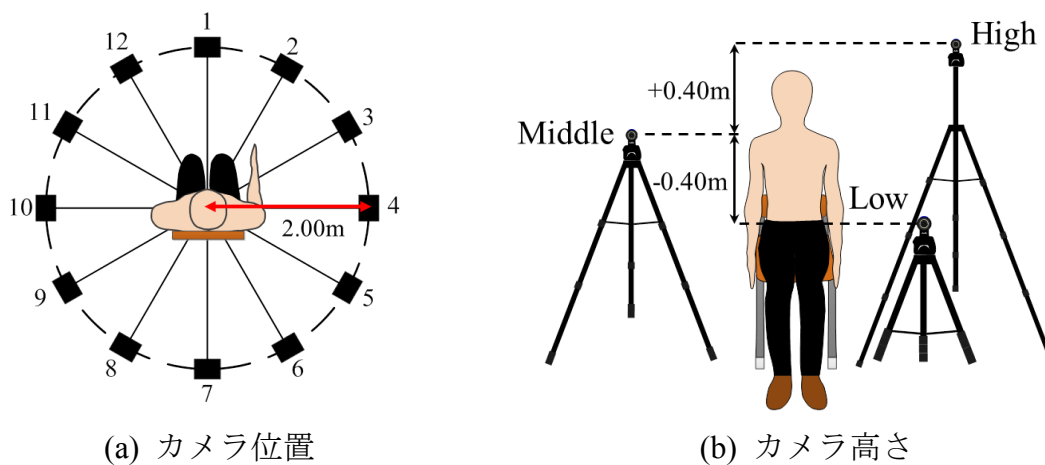


図 2-7 肩甲骨のマーカ変位と肩甲骨角度を測定するためのカメラ位置

粗大動作・机上動作時のマーカが消失しないカメラ位置・高さを調査するためのカメラ位置は、図 2-8 (a)の通り被験者を中心に半径 $r=2.00\text{m}$ の円周上に 30 度間隔にカメラを 12 か所とし、それぞれカメラ番号を 1~12 とする. カメラ高さは図 2-8 (b)の通りカメラ高さは被験者の肩峰高さ h を中として, $h+0.40\text{m}$ を高, $h-0.40\text{m}$ を低とした 3 通りを組み合わせた計 36 か所とする.

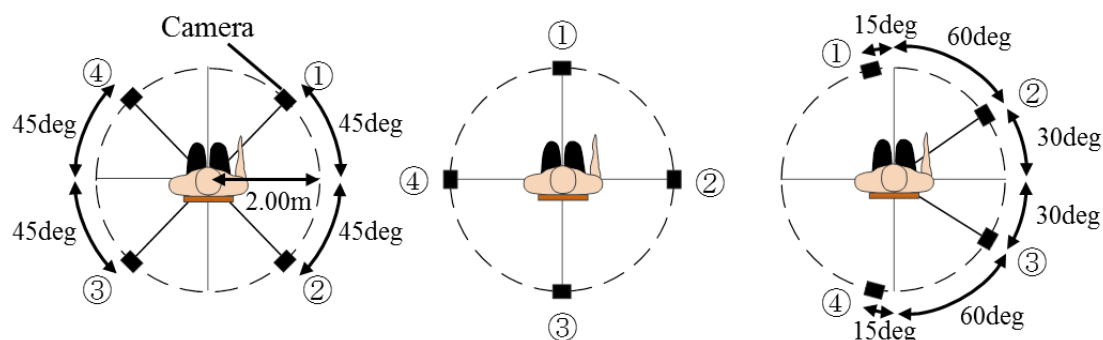


(a) カメラ位置

(b) カメラ高さ

図 2-8 粗大動作・机上動作時のマーカが消失しないカメラ位置・高さを調査するためのカメラ位置・高さ

パラメータ設計を用いた肩関節の屈曲・外転動作を測定するためのカメラ位置は、図 2-9 の通り被験者を中心に半径 $r=2.00\text{m}$ の円周上とし、(a)四隅のカメラ位置は、カメラを体中心を通る矢状面の左右に 1 台ずつ計 2 台、体中心を通る前額面の前後に 1 台ずつ計 2 台となる配置とする。(b)前後左右のカメラ位置は、カメラ①を正面とし、カメラ②を右に 90 度、カメラ③をカメラ①の対称となる位置、カメラ④をカメラ②の対称となる位置で配置する。(c)右腕測定シフトは肘に近い上腕骨内側上顆と手関節の橈骨茎状突起に設ける 2 マーカを軸に、肩関節動作中に前 2 台のカメラのフレームの中央部におさまる配置を、カメラを 15 度間隔で動かし調整する。後ろ 2 台は鏡像の配置とし、右腕測定に位置を偏向させた、4 台のカメラ間の角度が 75, 60, 75 度の間隔とし、カメラ①を正面より左へ 15 度の方向、カメラ②, ③を右に対し ± 30 度の方向、カメラ④を真後ろから左へ 15 度の方向とする。そして図 2-8 中のカメラ①の高さを肩峰からカメラの高さを $h+0.40\text{m}$ とし、カメラ高さを固定する。カメラ②~④は、測定条件によって高さを変更して計測する。



(a) 四隅 (b) 前後左右 (c) 右腕測定シフト

図 2-9 パラメータ設計を用いた肩関節の屈曲・外転動作を測定するためのカメラ位置

STEF を用いてマーカが消失しないカメラ位置・高さを調査するためのカメラ位置は図 2-10 の通り被験者を中心に半径 $r=2.00\text{m}$ の円周上とし, (a)四隅と(b)前後左右は図 2-9(a)四隅と(b)前後左右と同様とし, カメラ高さは 4 台全て肩峰高さ $h+0.40\text{m}$ とする. (c)高 5-中 5-高 11-中 12 は, 図 2-8(a)カメラ位置のカメラ番号を基準とし, カメラ番号 5 に肩峰高さ $h+0.40\text{m}$ のカメラ 1 台と肩峰高さ h のカメラ 1 台, カメラ番号 11 に肩峰高さ $h+0.40\text{m}$ のカメラ 1 台, カメラ番号 12 に肩峰高さ h のカメラ 1 台の計 3 条件とする.

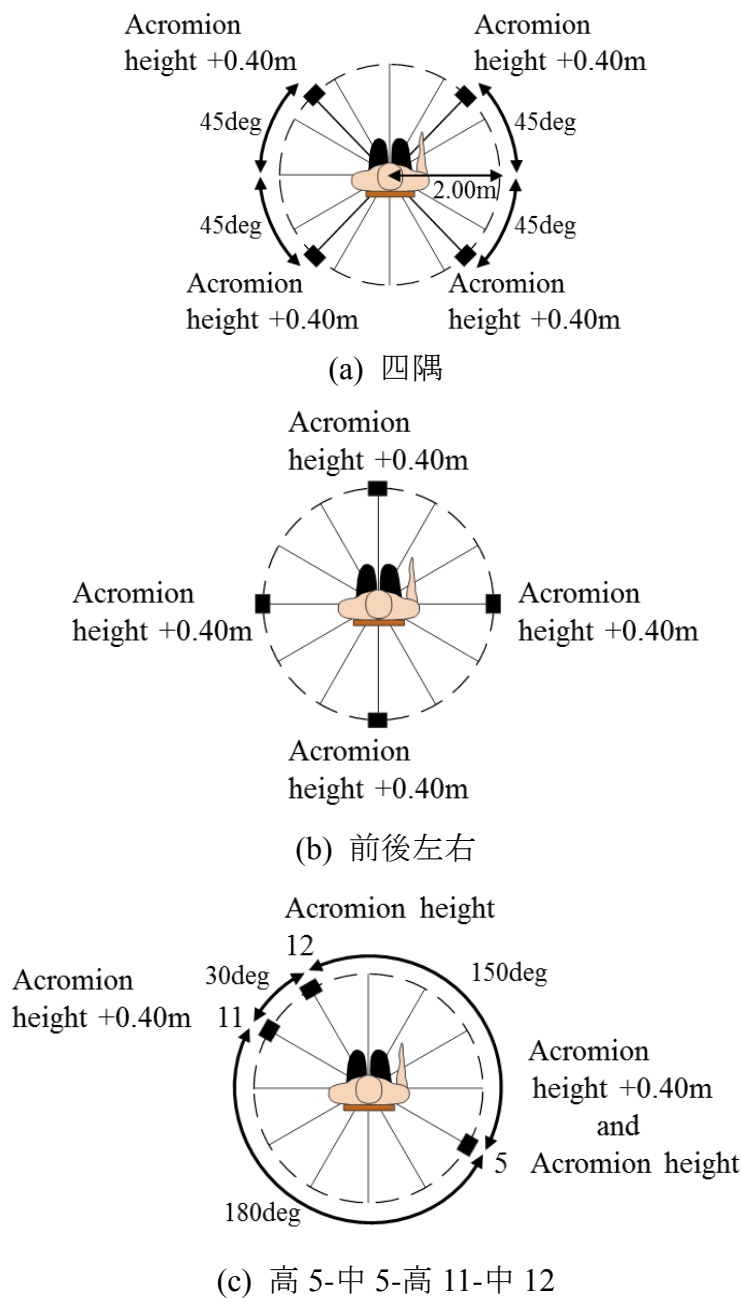


図 2-10 STEF を用いてマーカが消失しないカメラ位置・高さを調査するためのカメラ位置・高さ

2-4-3 マーカ位置

マーカ位置は、国際バイオメカニクス学会が推奨するマーカ位置を参考に⁽²⁸⁾、コンプレッションウェア着衣・非着衣時の肩甲骨上のマーカ変位と肩甲骨角度を測定するため、体幹の第7頸椎棘突起(C7 : 7th cervical spinous process), 第8胸椎棘突起(T8 : 8th thoracic vertebra spinous process)の2か所、肩甲骨の肩甲棘三角(TS : medial extremity of scapular spine), 下角(AI : angulus inferior scapulae), 肩峰角(AA : acromial angle)の3か所、計5か所に取り付けた(図 2-11, 図 2-12). マーカ位置の詳細は付録の表 A に記す. マーカ TS, AI, AA は肩甲骨のセグメントを定義するために使用する.

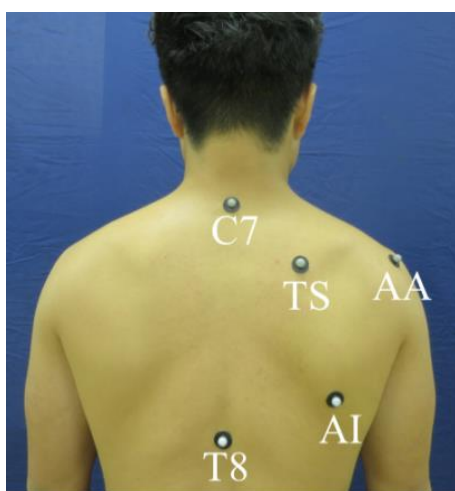


図 2-11 肩甲骨角度を算出するためのマーカ位置

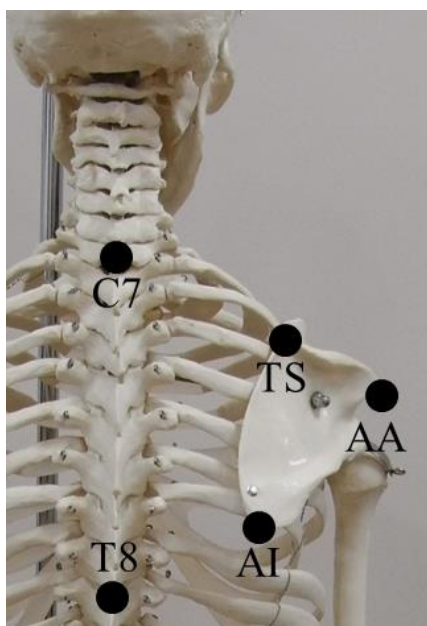


図 2-12 骨格上での肩甲骨のマーカ位置

パラメータ設計を用いた肩関節の屈曲・外転動作を測定するためのマーカ位置は体幹の第7頸椎棘突起(C7), 第8胸椎棘突起(T8), 頸切痕(IJ: Incisura jugularis), 剣状突起(PX: Processus xiphoideus)の4か所, 右上肢の肩峰(AC: Acromion), 内側上顆(EM: Elbow medial), 外側上顆(EL: Elbow lateral), 上腕(UA: Upper arm), 上腕前面(UAA: Upper arm anterior), 上腕後面(UAP: Upper arm posterior), 橈骨茎状突起(RS: Radial styloid), 尺骨茎状突起(US: Ulnar styloid), 手背部(FI: Dorsum of hand)の9か所, 計13か所に取り付けた(図2-13, 図2-14). マーカ位置の詳細は付録の表Aに記す. マーカC7, T8, IJ, PXは体幹のセグメントを定義するために使用する. マーカAC, EM, EL, UA, UAA, UAPは上腕のセグメントを定義するために使用する. マーカEM, EL, RS, USは前腕のセグメントを定義するために使用する. マーカRS, US, FIは手部のセグメントを定義するために使用する.

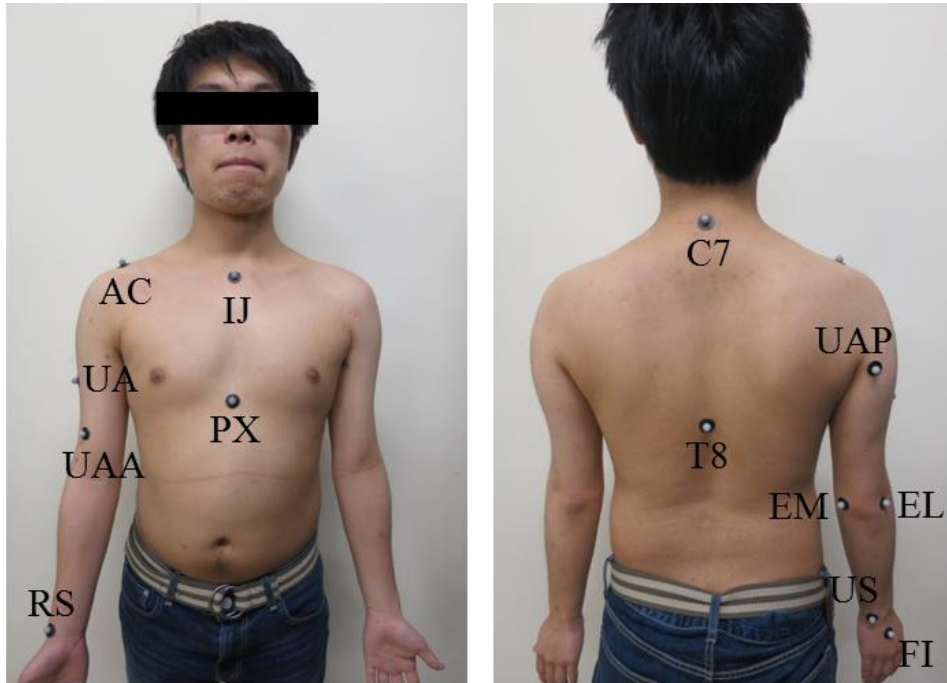


図 2-13 肩関節角度を算出するためのマーカ位置

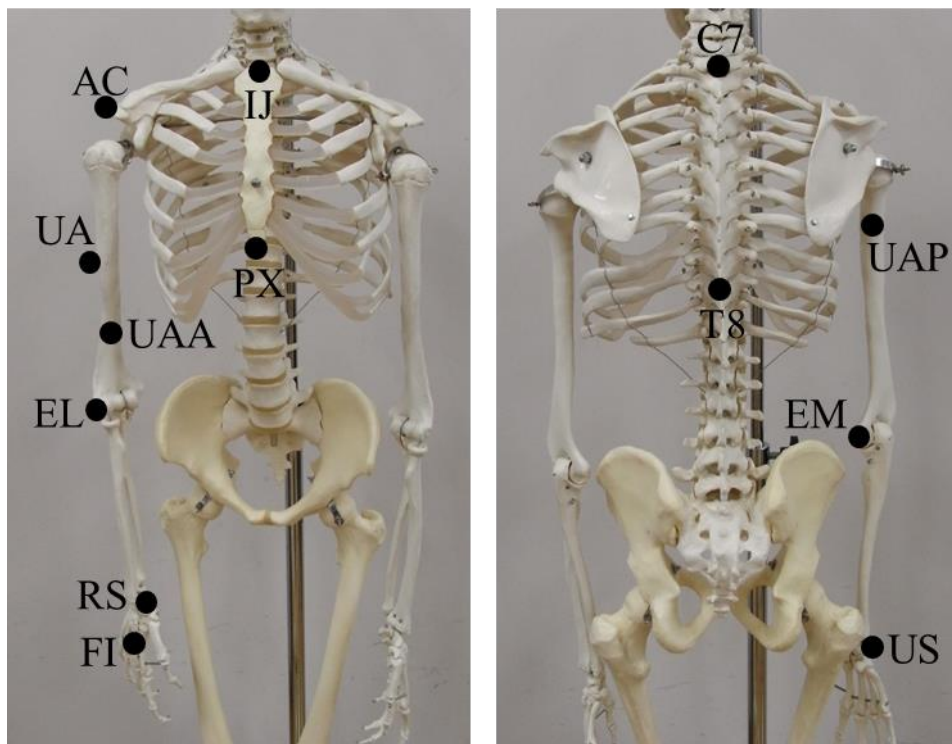


図 2-14 骨格上での体幹と右上肢のマーカ位置

マーカが消失しないカメラの位置・高さを調査するためのマーカ位置は体幹の第7頸椎棘突起(C7), 第8胸椎棘突起(T8), 頸切痕(IJ), 剣状突起(PX)の4か所, 肩甲骨の肩甲棘三角(TS), 下角(AI), 肩峰角(AA)の3か所, 右上肢の肩峰(AC), 内側上顆(EM), 外側上顆(EL), 上腕(UA), 上腕前面(UAA), 上腕後面(UAP), 橈骨茎状突起(RS), 尺骨茎状突起(US), 手背部(FI)の9か所, 計16か所に取り付けた(図2-15, 図2-16). マーカ位置の詳細は付録の表Aに記す. マーカC7, T8, IJ, PXは体幹のセグメントを定義するために使用する. マーカTS, AI, AAは肩甲骨のセグメントを定義するために使用する. マーカAC, EM, EL, UA, UAA, UAPは上腕のセグメントを定義するために使用する. マーカEM, EL, RS, USは前腕のセグメントを定義するために使用する. マーカRS, US, FIは手部のセグメントを定義するために使用する.

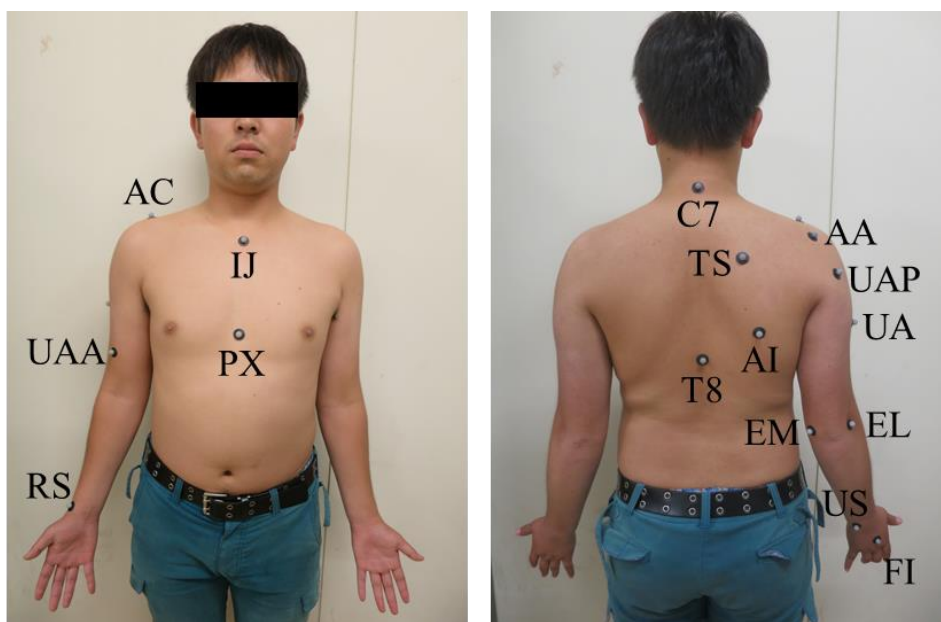


図 2-15 マーカが消えないカメラ位置・高さを調査するためのマーカ位置

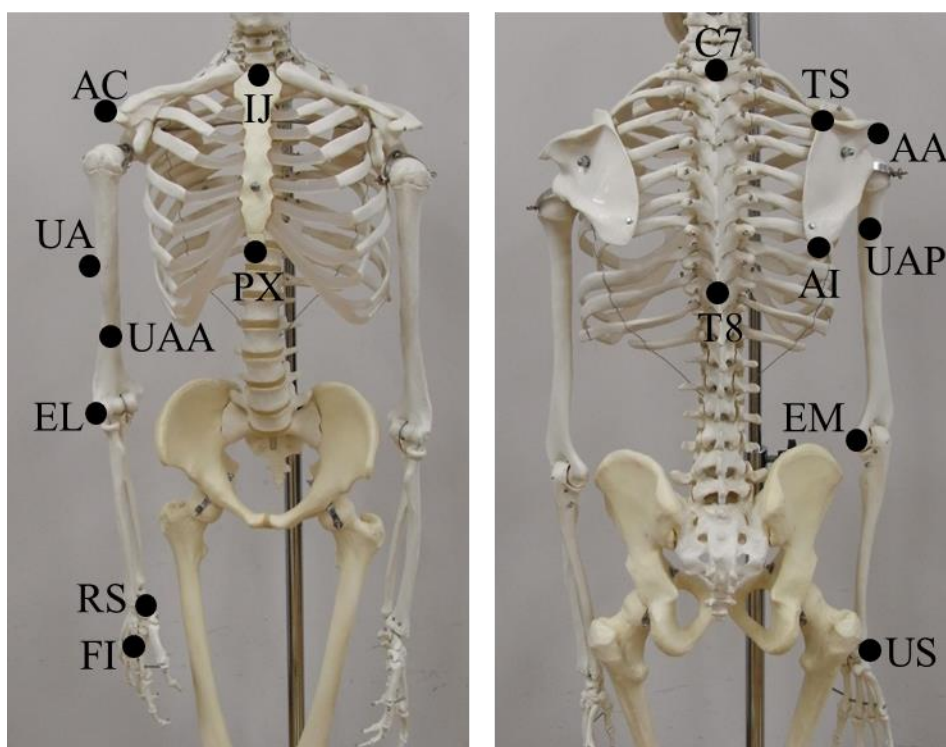
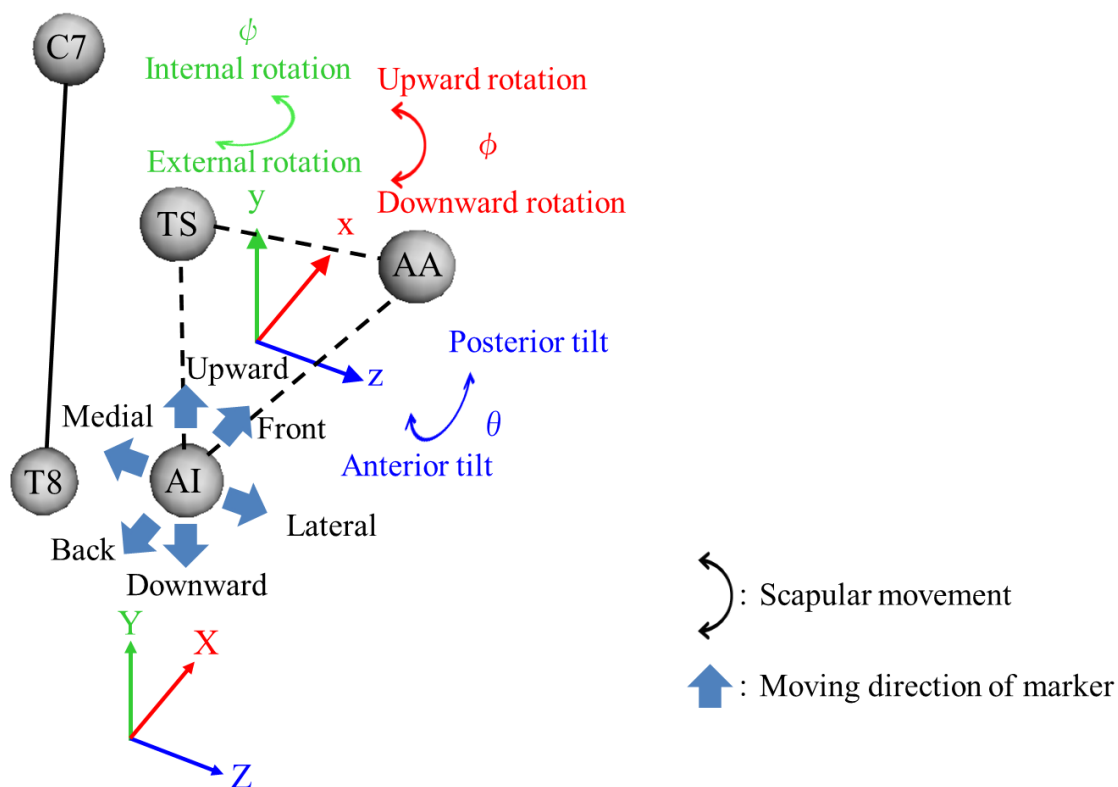


図 2-16 骨格上での体幹と肩甲骨と右上肢のマーカ位置

2-4-4 座標系の設定

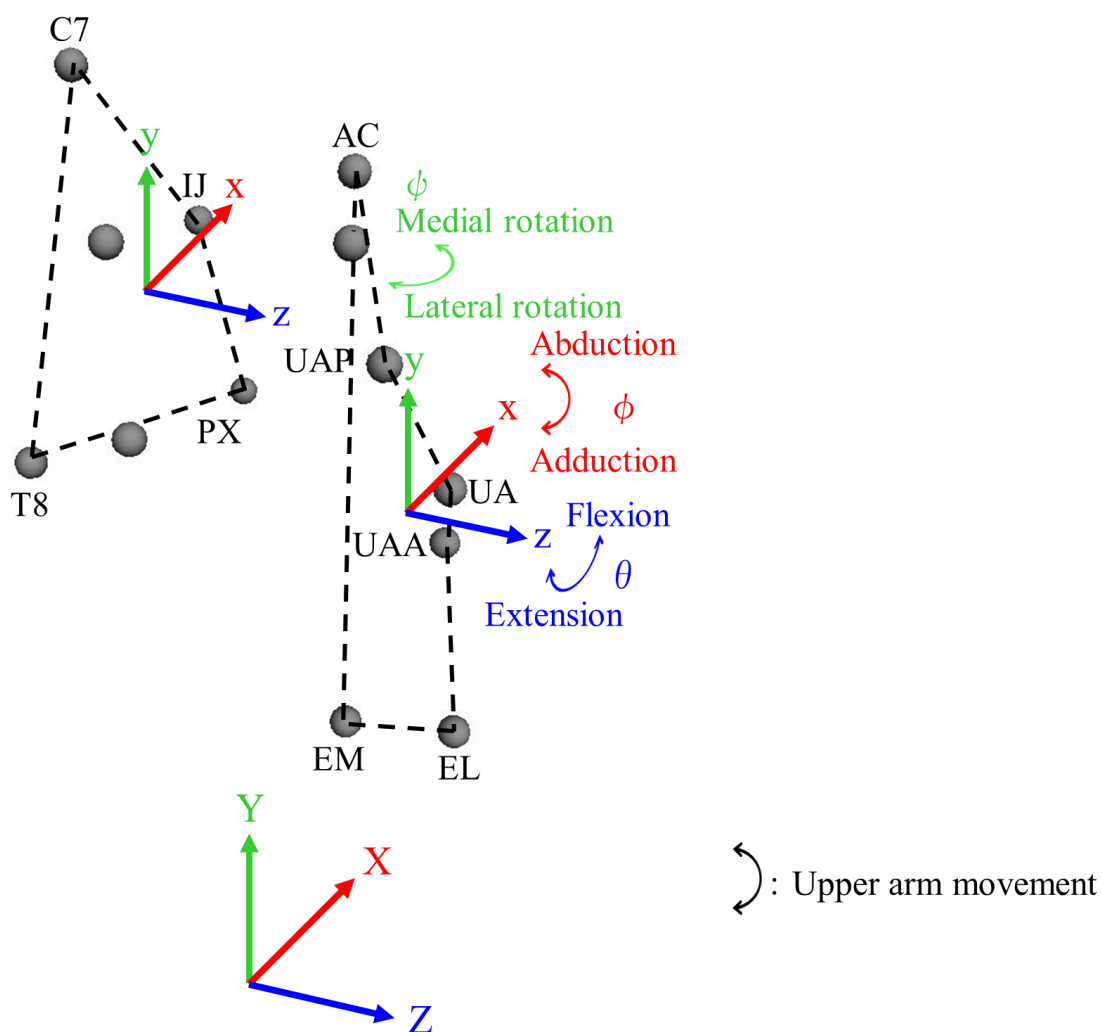
コンプレッションウェア着衣・非着衣時の肩甲骨上のマーカ変位と肩甲骨角度を測定するための実験では、TS, AI, AA のマーカ変位および肩甲骨角度を算出するために、図 2-17 の通り座標系を設定する。カメラ座標系を絶対座標系とし、被検者の矢状面前後方向を X 軸(前方/後方: +X/-X), 前額面内外側方向を Z 軸(外側/内側: +Z/-Z), 上下方向を Y 軸(上方/下方: +Y/-Y)とする。相対座標系は、マーカ TS, AI, AA の 3 マーカから定義したセグメントの肩甲骨剛体モデルに対して設定し、絶対座標系と同様に被検者の矢状面前後方向を x 軸(前方/後方: +x/-x), 前額面内外側方向を z 軸(外側/内側: +z/-z), 上下方向を y 軸(上方/下方: +y/-y)とする。x 軸周りの肩甲骨の運動を上方/下方回旋 ϕ , z 軸周りの運動を前傾/後傾 θ , y 軸周りの運動を外旋/内旋 ϕ とする。



XZY : 絶対座標系, xzy : 相対座標系

図 2-17 各座標系と相対座標の軸周りの運動

マーカが消失しないカメラの位置・高さを調査するための実験では、肩関節屈曲角度および外転角度を算出するために、図 2-18 の通り座標系を設定する。カメラ座標系を絶対座標系とし、被検者の矢状面前後方向を X 軸(前方/後方: +X/-X), 前額面内外側方向を Z 軸(外側/内側: +Z/-Z), 上下方向を Y 軸(上方/下方: +Y/-Y) とする。相対座標系は、マーカ C7, T8, IJ, PX の 4 つのマーカから定義するセグメントの体幹剛体モデル, AC, EM, EL, UA, UAA, UAP の 6 つのマーカから定義するセグメントの上腕剛体モデルに対し、絶対座標系と同様に被検者の矢状面前後方向を x 軸(前方/後方: +x/-x), 前額面内外側方向を z 軸(外側/内側: +z/-z), 上下方向を y 軸(上方/下方: +y/-y) とする。x 軸周りの上腕の運動を外転/内転 ϕ , z 軸周りの上腕の運動を屈曲/伸展 θ , y 軸周りの運動を外旋/内旋 ϕ とする。



XZY : 絶対座標系, xzy : 相対座標系

図 2-18 各座標系と相対座標の軸周りの運動

2-4-5 データ処理

コンプレッションウェア着衣・非着衣時の肩甲骨上のマーカ変位と肩甲骨角度を測定するためのマーカ変位および肩甲骨角度データ処理は，スタートポジションのマーカ位置および肩甲骨角度を全て 0 とし，各条件で測定した 1 動作から，マーカ変位はマーカ TS, AI, AA の変位を dr_{TA} , dr_{AI} , dr_{AA} (図 2-19)，肩甲骨角度は肩甲骨剛体モデルの上方回旋角度が最大時の外旋 ϕ ，後傾 θ とする。

統計処理は，直接皮膚にマーカを設置した条件とコンプレッションウェア上にマーカを設置した条件で得られた，マーカ変位および肩甲骨角度の値に統計的有意差がないとの仮説の基に，Steel-Dwass 検定を用いて全ての 2 群同士の比較を有意水準は 5%として行った。

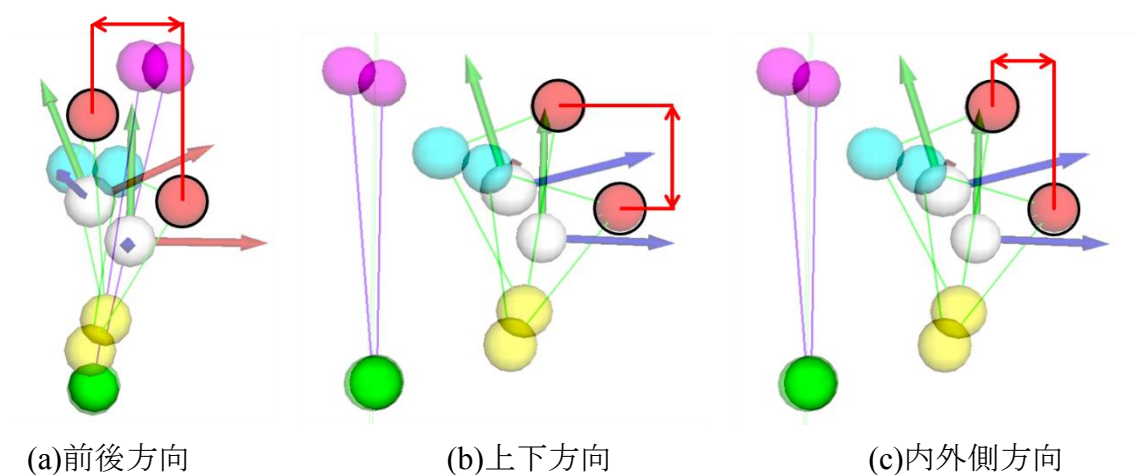


図 2-19 マーカ変位

マーカが消失しないカメラの位置・高さを調査するためのデータ処理は、各測定動作、各カメラ位置、各カメラ高さで撮影された図内で、認識できるマーカを目視でラベル付けを行った。図2-20に撮影画像の一例を示す。この図2-20 (a)から認識できるマーカにラベルを付けると、図2-20 (b)のようなIJ, PX, AC, UA, UAA, EL, US, FIの8つとなる。

ラベル付けを行ったものをカメラ位置、高さ、測定動作、マーカの認識有無、マーカ認識個数の順で表にまとめる。マーカが認識できたら○、認識できなかったら×と付け、各カメラ位置から認識できるマーカ個数を右の列に示す。



(a) ラベル付け前



(b) ラベル付け後

図2-20 ラベル付け

第3章

骨とマーカ間の誤差要因

本章では、上肢動作解析に光学式モーションキャプチャを導入するにあたり、骨とマーカ間の設定により生じる測定の誤差を論ずることを目的とする。

3-1 概要

コンプレッションウェア着衣・非着衣時の肩甲骨上のマーカ変位と肩甲骨角度の比較について述べる。コンプレッションウェアは肩甲骨にサポートのないコンプレッションウェアと肩甲骨にサポートのあるコンプレッションウェアの2条件とする。この2条件と皮膚に直接マーカを設置した1条件の計3条件を実験条件とする。マーカは体幹に2か所と肩甲骨に3か所の計5か所に設置し、肩甲骨の3マーカから剛体モデルを作成する。測定動作は肩甲骨の動きを伴う肩関節外転動作とする。被験者は、スタートポジションから右上肢を肘関節伸展状態で肩関節外転180degまで外転させ、スタートポジションに戻る動作を1動作とする。動作速度は被験者の自然な速度とし、測定前には十分な練習を行う。被験者は上肢の運動・感覚機能に既往歴のない右利き健常成人男性3名とし、試行回数は各条件で5回とする。

測定動作時の各マーカの変位と肩甲骨に設置した3つのマーカから算出した肩甲骨角度を、光学式モーションキャプチャで測定し、各条件間で比較を行った。直接皮膚にマーカを設置した条件とコンプレッションウェア上にマーカを設置した条件間で、マーカ変位および肩甲骨角度に統計的有意差がないとの仮説の基に、Steel-Dwass検定を用いて全ての2群同士の比較を有意水準は5%として行った。結果は、皮膚上に設置したマーカと比較してウェアの着用により、マーカ変位ではAIマーカの前後方向のみ有意に低い値を示し、肩甲骨角度では上方回旋角度と後傾角度が低い値を示した。

3-2 目的

臨床で簡易に動作解析を行うには、測定プロトコルを確立すること、機器セッティングを自動化しつつ、自動較正補正されることが期待されている。光学式モーションキャプチャでの身体計測では、マーカの計測誤差が算出される関節角度に大きく影響するため、現状裸体でマーカを皮膚に設置するか、服に穴をあけるか、服の上から設置する場合は、マーカが計測中に動かないように服ごと身体に固定する⁰。服ごと身体を固定すると動作に影響を及ぼすので負荷効果が問題となる。臨床では同じ空間に多数の人がいることから、服を着用しないでの計測や被検者ごとに着衣に穴を開ける準備をするのは現実的ではない。そこでウェア着用時でも測定ができるように、本実験では肩甲骨の皮膚上に設置したマーカの変位と着用したコンプレッションウェア上に設置したマーカ変位の比較および、肩甲骨の皮膚上に設置したマーカで作成する肩甲骨剛体モデルの姿勢角度変位とコンプレッションウェア上に設置したマーカで作成する肩甲骨剛体モデルの姿勢角度変位の比較から、コンプレッションウェアの着用によるマーカ誤差と肩甲骨角度の傾向を評価することを目的とする。

3-3 方法

3-3-1 測定条件

比較する測定条件は、①直接皮膚にマーカを設置、②肩甲骨にサポートのないコンプレッションウェア(以下、サポート無ウェア)、③肩甲骨にサポートのあるコンプレッションウェア(以下、サポート有ウェア)の3条件とする。使用したコンプレッションウェアはワコール社製 CW-X STYLE FREE® TOP とワコール社製 JYURYU® TOP とした(図 3-1)。CW-X STYLE FREE® TOP は、皮膚の伸びる方向と生地伸びる方向を合わせており、図 3-1 (a)の矢印の方向に生地が伸びるようになっている。JYURYU® TOP は、伸縮性の異なる2種類の生地を使用しており、伸びにくい生地で肩甲骨の周りを支えることで可動域を広げる特性を有する。



(a) CW-X STYLE FREE® TOP



(b) JYURYU® TOP

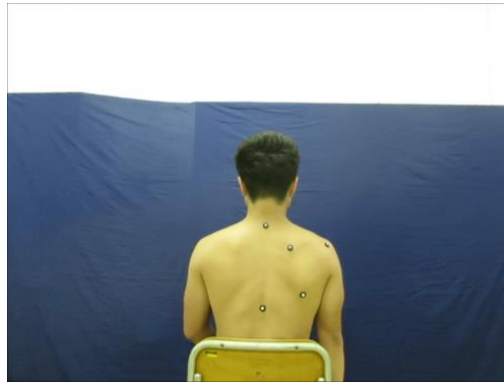
図 3-1 比較に着用したコンプレッションウェア

3-3-2 測定動作

肩甲骨は、胸郭背面上にあり肩甲胸郭関節を介し胸郭と、肩甲上腕関節を介し上腕骨と、肩鎖関節を介して鎖骨とつながり、鎖骨は胸鎖関節を介して胸骨とつながっており、これらの骨と関節で構成される肩複合体を上肢帯と呼ぶ⁽²⁹⁾。肩甲骨の動きは、上方回旋・下方回旋、内転・外転、前傾・後傾がある。一般的に上肢の拳上に対して肩甲上腕関節と肩甲骨の上方回旋の比は2:1であるとされ⁽³⁰⁻³²⁾、「肩甲上腕リズム」^(30,33)と呼ぶ。肩関節外転動作の可動域は180degであるため、肩甲上腕関節120deg、肩甲骨上方回旋60degの動きとみなせる。この時の肩甲骨の角度変化は、上方回旋方向への変化だけでなく、外旋・内旋方向、後傾方向への動きを伴う3次元運動である⁽³⁴⁾。

測定対象動作は肩甲骨の動きを伴う肩関節外転動作0degから180degとする(図3-2)。

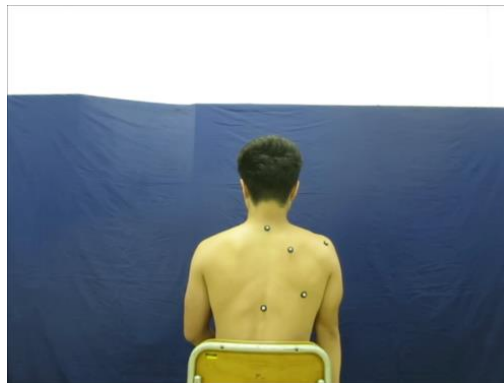
被験者は、椅子に深く腰掛け、背もたれに背を付け、体幹の前後・側屈がなく、両上肢を体幹に添って下垂した状態で座った姿勢をスタートポジションとする。スタートポジションから右上肢を肘関節伸展状態で肩関節外転180degまで外転させ、スタートポジションに戻る動作を1動作とする。動作速度は被験者の自然な速度とし、計測前には十分な練習を行う。試行回数は各条件で5回とする。



(a) スタートポジション



(b) 肩関節外転 180deg



(c) スタートポジションへ戻る

図 3-2 測定動作

3-4 結果・考察

本研究は東京電機大学ヒト生命倫理委員会の承認を受け(受付番号 25-66, 26-69, 27-72, 28-53, 29-79, 30-61), 被験者への事前説明を行い, 同意を得て実施した. 被験者は上肢の運動・感覚機能に既往歴のない右利き健常成人男性 3 名(平均±標準偏差: 年齢 22±0 歳, 身長 1.70±0m, 体重 65.3±6.2kg)であった.

3-4-1 結果

(1) マーカ変位

肩関節最大外転時のマーカの前後方向変位を図 3-3, 上下方向変位を図 3-4, 内外側方向変位を図 3-5 に示す.

マーカ TS での前後方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $-29.8 \pm 9.6\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $-28.0 \pm 5.8\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $-28.1 \pm 7.9\text{mm}$ である. AI での前後方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $14.2 \pm 5.8\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $1.8 \pm 3.9\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $4.3 \pm 4.1\text{mm}$ である. マーカ AA での前後方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $-65.1 \pm 17.2\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $-64.7 \pm 10.0\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $-62.8 \pm 8.8\text{mm}$ である. マーカの前後方向変位は, マーカ TS, AA においてはウェアの着用の有無, ならびにウェアの種類の間では有意差はなかった. マーカ AI では直接皮膚にマーカ設置時 (①) と比較してコンプレッションウェア着用時 (②, ③) のいずれも有意に低い値であった(①>②, ①>③: $p < 0.05$)(表 3-1).

マーカ TS での上下方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $4.5 \pm 4.7\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $11.5 \pm 5.0\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $15.3 \pm 4.7\text{mm}$ である. AI での上下方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $27.0 \pm 4.5\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $25.7 \pm 5.1\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $28.2 \pm 7.2\text{mm}$ である. マーカ AA での上下方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $67.2 \pm 4.8\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $55.9 \pm 5.4\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $62.5 \pm 5.6\text{mm}$ である. マーカの上下方向変位は, マーカ AI においてはウェアの着用の有無, ならびにウェアの種類の間では有意差はなかった. マーカ TS では直接皮膚にマーカ設置時 (①) と比較してコンプレッションウェア着用時 (②, ③) で有意に高い値であった(②>①, ③>①: $p < 0.05$). マーカ AA では直接皮膚にマーカ設置時 (①) と比較しサポート無ウェア (②) は有意に低く, サポート有ウェア (③) はサポート無ウェア (②) に対し有意に高い値であった(①>②, ③>②: $p < 0.05$)(表 3-2).

マーカ TS での内外側方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $-36.8 \pm 19.0\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $-40.7 \pm 15.1\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $-41.2 \pm 10.4\text{mm}$ である. AI での内外側方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $2.8 \pm 10.5\text{mm}$, サポート無ウェア (②) で $-4.0 \pm 9.3\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $-1.9 \pm 6.8\text{mm}$ である. マーカ AA での内外側方向変位は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $-74.9 \pm 27.7\text{mm}$,

サポート無ウェア (②) で $-76.1\pm 21.1\text{mm}$, サポート有ウェア (③) で $-79.7\pm 13.1\text{mm}$ である. マーカの内外側方向の平均変位は, マーカ TS, AI, AA のいずれの条件間においても有意差はなかった. マーカ AA では直接皮膚にマーカ設置時 (①) の標準偏差がコンプレッションウェア着用時 (②, ③) よりも大きな値であった(表 3-3).

表 3-1 肩甲骨最大外転時のマーカの前後方向変位の平均値と標準偏差

	Anterior(+)/Posterior(-)		
	TS	AI	AA
	mean±SD	mean±SD	mean±SD
on skin	-29.8±9.6	14.2±5.8	-65.1±17.2
on an inner shirt without scapula support	-28.0±5.8	1.8±3.9	-64.7±10.0
on an inner shirt with scapula support	-28.1±7.9	4.3±4.1	-62.8±8.8

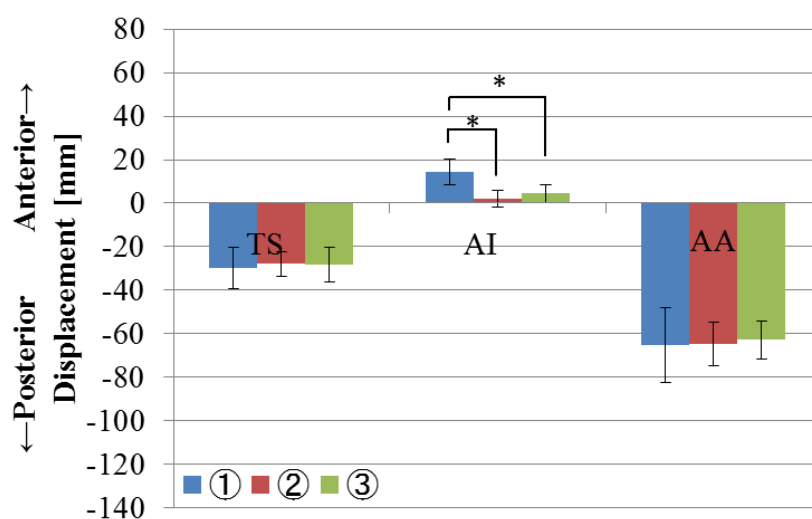


図 3-3 肩関節最大外転時のマーカの前後方向変位 (n=15, p<0.05)

表 3-2 肩甲骨最大外転時のマーカの上下方向変位の平均値と標準偏差

	Upward(+)/Downward(-)		
	TS mean±SD	AI mean±SD	AA mean±SD
on skin	4.5±4.7	27.0±4.5	67.2±4.8
on an inner shirt without scapula support	11.5±5.0	25.7±5.1	55.9±5.4
on an inner shirt with scapula support	15.3±4.7	28.2±7.2	62.5±5.6

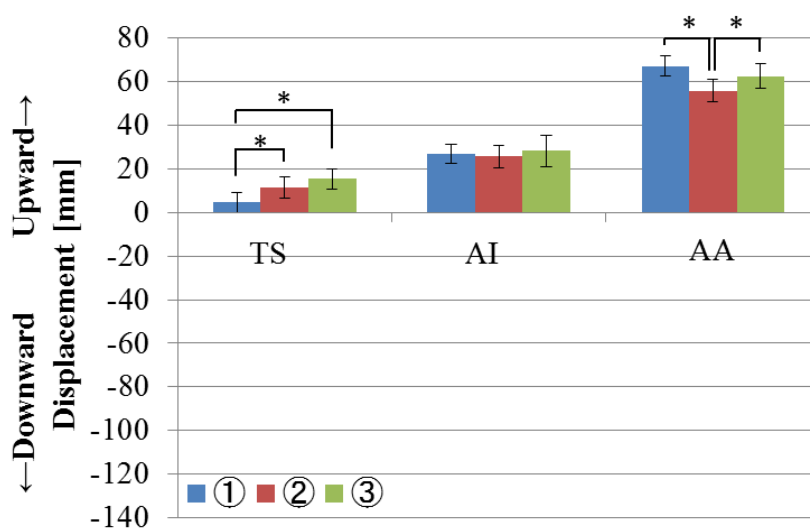


図 3-4 肩甲骨最大外転時のマーカの上下方向変位(n=15, p<0.05)

表 3-3 肩甲骨最大外転時マーカの内外側方向変位の平均値と標準偏差

	Lateral(+)/Medial(-)		
	TS	AI	AA
	mean±SD	mean±SD	mean±SD
on skin	-36.8±19.0	2.8±10.5	-74.9±27.7
on an inner shirt without scapula support	-40.7±15.1	-4.0±9.3	-76.1±21.1
on an inner shirt with scapula support	-41.2±10.4	-1.9±6.8	-79.7±13.1

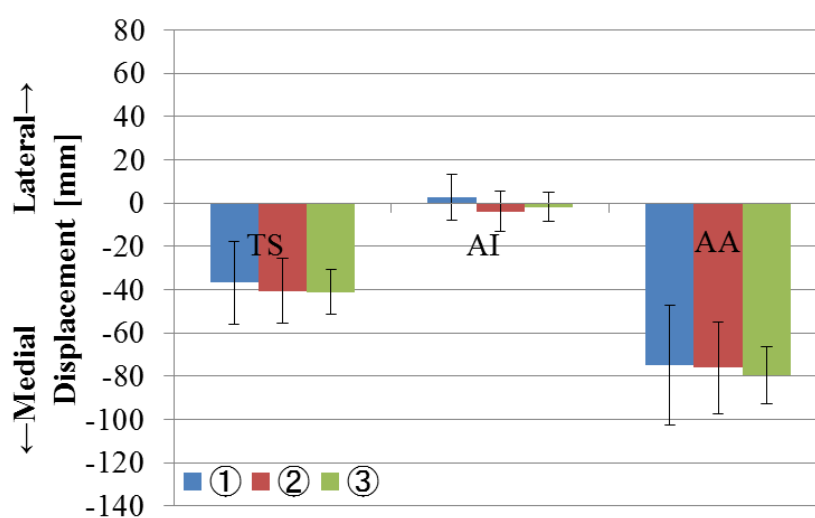


図 3-5 肩甲骨最大外転時のマーカの内外側方向変位(n=15, not significant)

(2)肩甲骨角度

肩関節最大外転時の肩甲骨角度を図 3-6 に示す. 平均肩甲骨上方回旋角度は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $26.5\pm 6.8\text{deg}$, サポート無ウェア (②) で $18.5\pm 3.8\text{deg}$, サポート有ウェア (③) で $20.4\pm 3.5\text{deg}$ である. 直接皮膚にマーカ設置時 (①) に対しコンプレッションウェア着用時 (②, ③) で有意に低い値であった(①>②, ①>③ : $p<0.05$) (表 3-4).

平均肩甲骨外旋角度は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $13.8\pm 3.7\text{deg}$, サポート無ウェア (②) で $19.9\pm 3.5\text{deg}$, サポート有ウェア (③) で $14.1\pm 2.1\text{deg}$ である. 直接皮膚にマーカ設置時 (①) と比較しサポート無ウェア (②) は有意に高く, サポート有ウェア (③) と比較しサポート無ウェア (②) は有意に高い値であった(②>①, ②>③ : $p<0.05$) (表 3-4).

平均肩甲骨後傾角度は直接皮膚にマーカ設置時 (①) で $23.5\pm 2.3\text{deg}$, サポート無ウェア (②) で $17.8\pm 2.0\text{deg}$, サポート有ウェア (③) で $16.6\pm 3.8\text{deg}$ である. 直接皮膚にマーカ設置時 (①) に対しコンプレッションウェア着用時 (②, ③) で有意に低い値であった(①>②, ①>③ : $p<0.05$) (表 3-4).

表 3-4 肩関節最大外転時の肩甲骨角度の平均値と標準偏差

All Subject			
	x	y	z
	mean±SD	mean±SD	mean±SD
on skin	26.5±6.8	13.8±3.7	23.5±2.3
on an inner shirt without scapula support	18.5±3.8	19.9±3.5	17.8±2.0
on an inner shirt with scapula support	20.4±3.5	14.1±2.1	16.6±3.8

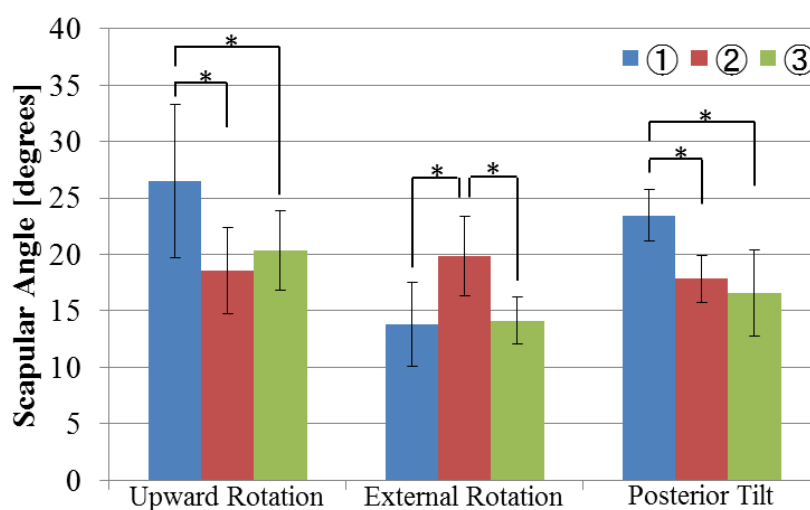


図 3-6 肩関節最大外転時の肩甲骨角度(n=15, p<0.05)

3-4-2 考察

(1) マーカ変位

マーカ AI の前方変位は皮膚上に設置したマーカと比較してコンプレッションウェア上に設置したマーカで小さな値を示したことから、マーカ TS の上方変位は皮膚上に設置したマーカと比較してコンプレッションウェア上に設置したマーカで大きな値を示す傾向は、全被験者で確認された。

マーカ AI の前方変位でコンプレッションウェア着用時の変位が小さい理由として、コンプレッションウェアの着用により動作時にコンプレッションウェアと皮膚の間に隙間ができ、マーカが浮きあがり体表面と骨格を追従していない状態になったことが原因であると考えられる(図 3-7)。

さらに、マーカ TS の上方変位でコンプレッションウェア着用時のほうが動作変位が大きいことが確認された。この原因はコンプレッションウェアが伸びてマーカが上方に変位したのが原因と推測される(図 3-8)。

また、マーカ AA の内側変位で標準偏差が大きな値となった理由は、被験者 3 名中 1 名で他の被験者と比較して上部体幹の側屈が大きかったことが原因であったと考えられる。被験者別の直接皮膚にマーカ設置時 (①) のマーカ AA の内側変位は、被験者 A: $-57.2 \pm 7.7\text{mm}$ 、被験者 B: $-112.7 \pm 9.7\text{mm}$ 、被験者 C: $-54.7 \pm 1.8\text{mm}$ であり、被験者 B の内側変位が大きな値となっている。さらに、図 3-9 の直接皮膚にマーカ設置時 (①) のマーカ C7, T8 の内外側方向の平均変位から、マーカ T8 は背を椅子の背もたれに付けているため被験者 3 名とも変位は少ないが、マーカ C7 の変位は被験者 B で大きい値となっていることがわかる。

本研究では、皮膚に直接設置したマーカを基準とし、コンプレッションウェア上にマーカを設置することで生じる差を比較した。本来関節角度を算出することを目的とすると皮膚の下で動く骨の動きを正確に測定できる MRI⁽³⁵⁾ や X 線⁽³⁶⁾ を使用することが望ましいが、これらの計測は大規模な計測機器が必要で、静的な測定となり測定姿勢肢位も制限される問題がある。そのため、骨の動きを計測することができないが、測定肢位に制限がなく動的に測定できる光学式モーションキャプチャは、義手使用時の動作観察・評価に有効である。皮膚の伸張量を測定した水野⁽³⁷⁾ らは、手掌部の上方への伸張が 0.4mm 、側方が 0.7mm に対し、肩甲骨付近の伸張は上方への伸張が 1.5mm 、側方が 2.4mm と、皮膚の伸張量は身体の部位によって異なると報告している。原田⁽³⁸⁾ らも、肩甲骨付近の皮膚の伸びは垂直方向に 1.8mm 、水平方向に 2.5mm と同程度と報告している。このことから肩甲骨付近の皮膚伸張量は 2mm 程度であると考えられる。

本研究ではコンプレッションウェアの着用による測定を行っており、皮膚伸張量に加えてウェア自体の伸びを考慮する必要がある。そこで、皮膚とウェアとの間の誤差を軽減するために、皮膚とウェアとの間に両面テープなどを付けて、ウ

ウェアが皮膚上を滑らなくさせることで、皮膚とウェア、マーカの間誤差を最小にするなどの方法の提案とその検証が望まれる。

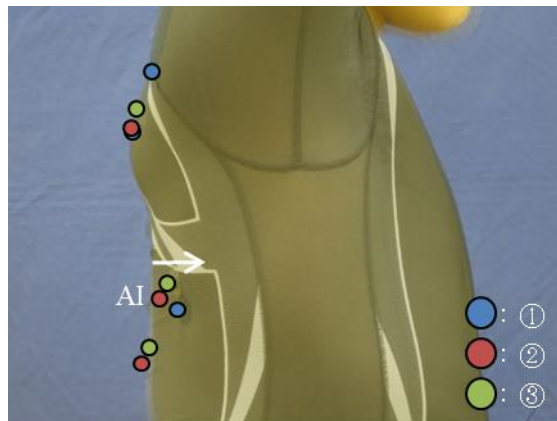


図 3-7 マーカ AI の前後方向変位

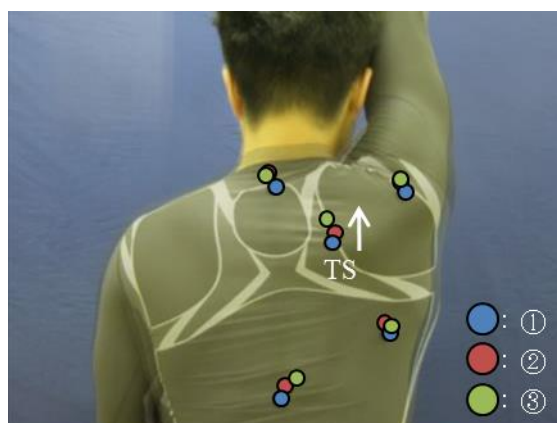


図 3-8 マーカ TS の上下方向変位

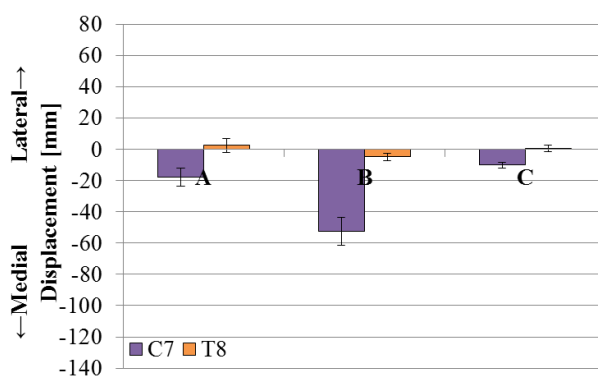


図 3-9 被験者別のマーカ C7, T8 の内外側方向変位

(2)肩甲骨角度

肩甲骨の上方回旋角度ならびに後傾角度は、皮膚上に設置したマーカと比較してコンプレッションウェア上に設置したマーカは小さい値であったことは全被験者で確認された。実験結果は、直接皮膚にマーカ設置時 (①) で上方回旋 $26.5\pm 6.8\text{deg}$ 、外旋 $13.8\pm 3.7\text{deg}$ 、後傾 $23.5\pm 2.3\text{deg}$ であったのに対し、Bourne⁽³⁹⁾らの骨ピンを用いて侵襲かつ動的な肩甲骨角度の計測では、上方回旋 $49\pm 7\text{deg}$ 、外旋 $27\pm 11\text{deg}$ 、後傾 $44\pm 11\text{deg}$ であり、本研究と同様に光学式モーションキャプチャを用いた Janes⁽⁴⁰⁾らの動的な計測では、上方回旋 $38\pm 7\text{deg}$ 、外旋 $7\pm 5\text{deg}$ 、後傾 $8\pm 4\text{deg}$ であった。

本研究ではさらに、コンプレッションウェアを着用した状態で測定を行った結果、直接皮膚に設置した状態と比較してコンプレッションウェアでは、骨と皮膚との間の面上の誤差に加え、皮膚とウェアの間では体表面からの浮き上がりによる誤差も加わったため低い値を示したと考えられる。肩甲骨角度は TS, AI, AA の 3 マーカから作成した肩甲骨剛体モデルの各軸方向の回転によって角度を算出しているため、各マーカの骨特徴点からのズレが肩甲骨剛体モデルの形状に大きく影響を与える。そのため、マーカの骨特徴点からのズレを最小限にすることが肩甲骨角度の正確な測定につながると考えられる。

3-5 第3章のまとめ

本章では、コンプレッションウェア上にマーカを設置した状態で光学式モーションキャプチャにて肩関節外転動作時の上肢動作測定におけるマーカ変位と肩甲骨角度の特徴を考察した。

本実験のマーカ変位の評価では皮膚に直接マーカを設置した状態を理想としてウェアの着用の比較，検討をしたが，厳密には骨格の位置姿勢変化による関節角度変位の導出には皮膚と骨特徴点のズレも計測精度の低下につながるということがわかっている⁽⁴¹⁾。このことから今後は，コンプレッションウェア上のマーカ誤差を補正しつつ，関節角度変位を導き，適切な姿勢での動作訓練を支援する方法を検討することが課題となる。

第4章

マーカとカメラ間の誤差要因

本章では、粗大動作・机上動作の異なる動作時においてマーカの捕捉が最もできるにカメラ位置・高さについて述べる。

4-1 概要

被験者は上肢の運動・感覚機能に既往歴のない右利き健常成人男性2名とし、光学式モーションキャプチャのカメラ位置12か所とカメラ高さ3段階を組み合わせた計36か所で測定を行った。マーカは体幹に4か所、肩甲骨に3か所、右上肢に9か所の計16か所の皮膚上に設置し、粗大動作の11姿勢、机上動作15姿勢の計26姿勢を対象に測定を行った。各条件での撮影画像内の捕捉マーカを目視でラベル付けを行う。

4-2 目的

光学式モーションキャプチャでの動作解析時の問題点の1つとして、計測時のマーカの消失や誤認識がある。光学式モーションキャプチャが多く用いられている歩行などの動力学解析^(1,2)では、カメラを動作計測空間対して均等に配置して⁽⁸⁾計測が行われる。この際、膝関節内側や足関節内側に設置されるマーカはタイミングによっては消失する場合はあるが、膝関節外側や足関節外側のマーカと誤認識する可能性は低い。その理由として、身体の構造として膝関節や足関節が急に反転することがないという解剖学的、マーカ間の条件、マーカ速度変化の上限等の制約条件が付加しているからである。

一方、光学式モーションキャプチャでの上肢の動作解析は、義手使用者と非切断者の動作比較による代償動作解析⁽³⁾や筋電義手と能動義手の動作比較⁽⁴⁾があり、計測時のカメラの配置に関しての最適化検証は少なく、歩行計測時と同様に動作計測空間対して均等に配置し頭上から計測が行われている。この状態では、肘関節内側のマーカは消失することが多い。さらに、手関節に設置される橈骨茎状突起や尺骨茎状突起はマーカの消失も多く、回内外の動作を追跡できなくなり判断ができず、誤認識が生じる場合が多い。日常生活動作での上肢動作の多くは、前腕の回内外機能を用いるため、膝関節や足関節とは違い、急に反転させる可能性があるため、誤認識を生じやすくなる。マーカの消失や誤認識は、計測後のデータ解析にも大きく影響する。

これらの問題を解決するためには、マーカの消失を少なくすることが最も効果的な方法であると考えられる。そのために本研究では、計測姿勢別にマーカが消失しないカメラの位置や高さを実験的に調査・解析することを目的とする。

4-3 方法

4-3-1 測定条件

測定は、カメラの位置とカメラの高さの組み合わせで条件を設定し、カメラ位置は θ を12か所(図 2-6 a)とカメラ高さ h を3通り(図 2-6 b)を組み合わせた計36か所とする。カメラ位置は、被験者を中心に半径 $r=2.00\text{m}$ の円周上に30度間隔で①～⑫設置する。カメラ高さは、被験者の肩峰高さ h を中として、 $h+0.40\text{m}$ を高、 $h-0.40\text{m}$ を低とする。

対象となる測定動作は粗大動作 11 姿勢と机上動作 15 姿勢とする。机上動作時は被験者の前に机を設置して、机上の各位置に手部を移動させて測定を行う(図 4-1)。机上動作での各動作は机に目印を設定することで再現性を高めた。

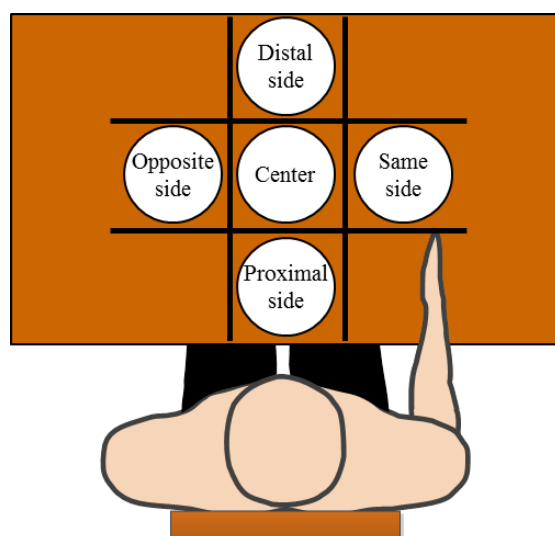


図 4-1 机上動作での手部の位置

4-3-2 測定動作

測定動作は, 粗大動作の 11 姿勢, 机上動作 15 姿勢の計 26 姿勢とする(表 4-1). 実験動作の詳細な姿勢は表 3-2 に示す. 被験者には椅子に深く腰掛け, 背もたれに背を付け, 体幹の前後・側屈がなく, 両上肢を体幹に沿って下垂した状態をスタートポジションとする. スタートポジションから指定した動作を行い, 静止した状態で撮影を行う.

表 4-1 測定動作一覧

	Posture
Gross movement	Upper limb droop along the trunk
	Shoulder flexion 90 deg, forearm neutral position
	Shoulder flexion 90 deg, forearm pronation
	Shoulder flexion 90 deg, forearm supination
	Shoulder abduction 90 deg, forearm neutral position
	Shoulder abduction 90 deg, forearm pronation
	Shoulder abduction 90 deg, forearm supination
	Shoulder abduction 180 deg
	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm neutral position
	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm pronation
	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm supination
Top movement	Hand position proximal side, forearm neutral position
	Hand position proximal side, forearm pronation
	Hand position proximal side, forearm supination
	Hand position opposite side, forearm neutral position
	Hand position opposite side, forearm pronation
	Hand position opposite side, forearm supination
	Hand position same side, forearm neutral position
	Hand position same side, forearm pronation
	Hand position same side, forearm supination
	Hand position distal side, forearm neutral position
	Hand position distal side, forearm pronation
	Hand position distal side, forearm supination
	Hand position center, forearm neutral position
	Hand position center, forearm pronation
	Hand position center, forearm supination

4-4 結果・考察

本研究は東京電機大学ヒト生命倫理委員会の承認を受け(前述), 被験者への事前説明を行い, 同意を得て実施した. 上肢の運動・感覚機能に既往歴のない右利き健常成人男性2名(被験者A, 年齢21歳, 身長1.65m, 体重70kg), (被験者B, 年齢:22歳, 身長:1.73m, 体重:80kg)とした. 被験者Aは粗大動作, 被験者Bは机上動作の測定を行う.

4-4-1 結果

図2-16でラベル付けを行ったものをカメラ位置, 高さ, 測定動作, マーカの認識有無, マーカ捕捉個数の順で表にまとめる. 表4-2はカメラ位置:1~12, カメラ高さ:高, 中, 低, 測定動作:腕下垂で16個のマーカが認識できたら○, 認識できなかったら×と付け, 各カメラ位置から捕捉できるマーカ個数を右の列に示す. 粗大動作の結果の詳細は, 付録の表B-1~B-11に記す. 机上動作の結果の詳細は, 付録の表C-1~C-15に記す.

表付けして得られた結果を粗大運動と机上運動の2つに分けて, 結果, 考察を示す.

表 4-2 結果の一例

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Upper limbs droop along the trunk	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	11
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	8
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5
1	Middle	Upper limbs droop along the trunk	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	11
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	×	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	○	11
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	8
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5
1	Low	Upper limbs droop along the trunk	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	11
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	○	11
8			×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	7
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			×	×	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	5

(1)粗大動作

カメラ位置 12 か所とカメラ高さ 3 通りの合計 36 か所から 4 台のカメラで撮影すると仮定して、4 か所を選ぶと組み合わせは 58905 通りである。この組み合わせから 16 か所のマーカ全てが最低 2 か所以上カメラで捕捉できる組み合わせを抽出した。これを粗大動作の 11 姿勢全てで行い、11 姿勢全てで共通する組み合わせを抽出した。

その結果、11 姿勢全てで 16 か所のマーカ全てが最低 2 か所以上捕捉できる組み合わせはなかった。最もマーカを捕捉できる姿勢の数が多い組み合わせは、高 1-高 5-中 5-中 11、高 5-中 5-中 11-高 12、高 5-中 5-中 11-中 12、高 5-中 5-中 11-低 11 の 4 つの組み合わせで、10 姿勢であった(表 4-3)。

表 4-3 粗大動作での結果

Posture	High 1-High 5-	High 5-Middle 5-	High 5-Middle 5-	High 5-Middle 5-
	Middle 5-Middle 11	Middle 11-High 12	Middle 11-Middle 12	Middle 11-Low 11
Upper limb droop along the trunk	×	×	×	×
Shoulder flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	○	○
Shoulder flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	○	○
Shoulder flexion 90 deg, forearm supination	○	○	○	○
Shoulder abduction 90 deg, forearm neutral position	○	○	○	○
Shoulder abduction 90 deg, forearm pronation	○	○	○	○
Shoulder abduction 90 deg, forearm supination	○	○	○	○
Shoulder abduction 180 deg	○	○	○	○
Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	○	○
Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	○	○
Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm supination	○	○	○	○

(2)机上動作

カメラ位置 12 か所とカメラ高さ 3 通りの合計 36 か所から 4 台のカメラで撮影すると仮定して、4 か所を選ぶと組み合わせは 58905 通りである。この組み合わせから 16 か所のマーカ全てが最低 2 か所以上カメラで捕捉できる組み合わせを抽出した。これを机上動作の 15 姿勢全てで行い、15 姿勢全てで共通する組み合わせを抽出した。

結果、15 姿勢全てで 16 か所のマーカ全てが最低 2 か所以上捕捉できる組み合わせはなかった。最も、マーカを捕捉できる姿勢の数が多い組み合わせは、高 5-中 5-高 11-中 12 の組み合わせで、11 姿勢であった(表 4-4)。

表 4-4 机上動作での結果

Posture	High 5-Middle 5- High 11-Middle 12
Hand position proximal side, forearm neutral position	×
Hand position proximal side, forearm pronation	○
Hand position proximal side, forearm supination	×
Hand position opposite side, forearm neutral position	×
Hand position opposite side, forearm pronation	○
Hand position opposite side, forearm supination	×
Hand position same side, forearm neutral position	○
Hand position same side, forearm pronation	○
Hand position same side, forearm supination	○
Hand position distal side, forearm neutral position	○
Hand position distal side, forearm pronation	○
Hand position distal side, forearm supination	○
Hand position center, forearm neutral position	○
Hand position center, forearm pronation	○
Hand position center, forearm supination	○

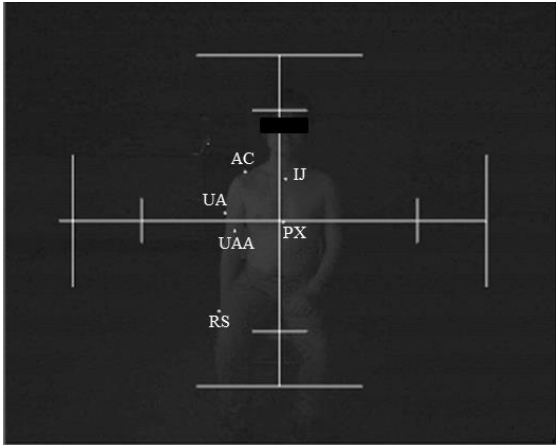
4-4-2 考察

(1)粗大動作

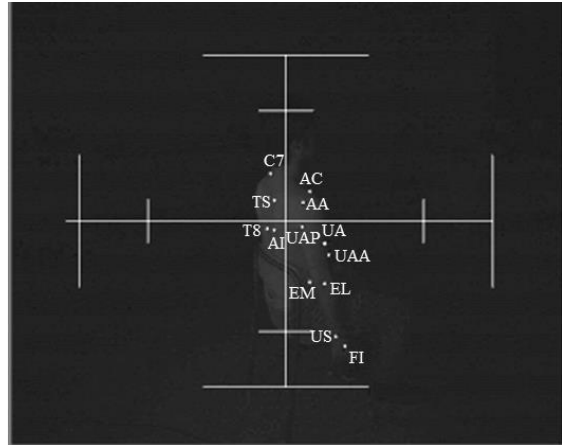
マーカを最も捕捉できる姿勢の数が多い組み合わせは、高 1-高 5-中 5-中 11、高 5-中 5-中 11-高 12、高 5-中 5-中 11-中 12、高 5-中 5-中 11-低 11 の 4 つの組み合わせで、10 姿勢であったが、この 4 つの組み合わせ全てで腕下垂の姿勢での RS のマーカが 2 か所以上捕捉できなかった。

高 1-高 5-中 5-中 11 では RS のマーカが高 1 でのみ捕捉できていたが、高 5、中 5、中 11 のカメラでは RS を捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-2、結果をまとめたものを表 4-5 に示す。高 5-中 5-中 11-高 12 では RS のマーカを全てのカメラで捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-3、結果をまとめたものを表 4-6 に示す。高 5-中 5-中 11-中 12 では RS のマーカを全てのカメラで捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-4、結果をまとめたものを表 4-7 に示す。高 5-中 5-中 11-低 11 では RS のマーカを全てのカメラで捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-5、結果をまとめたものを表 4-8 に示す。

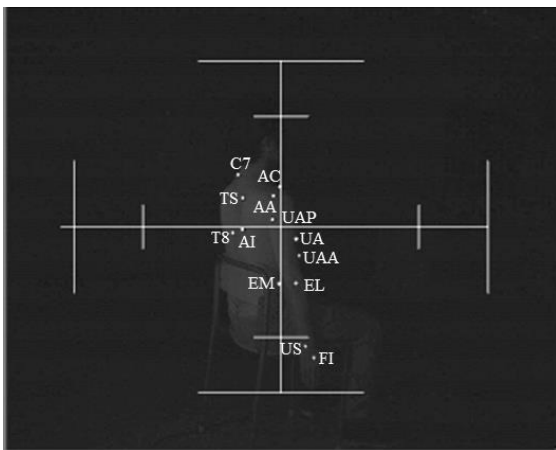
腕下垂の姿勢の場合、RS が捕捉できているカメラは高では 1, 2, 3, 4 の 4 台、中では 1, 2, 3, 4 の 4 台、低では 2, 3, 4 の 3 台であった。これは右腕を測定している被験者の正面から、90 deg 円周上を右腕側に移動した空間までのカメラ位置までである。カメラ位置：5~9 ではカメラの高さにかかわらず、カメラが被験者の後面にあるため、腕下垂時に身体の前面にある RS は捕捉することはできない。また、カメラ位置：10~12 ではカメラは被験者の前面にあるが、測定をしている右腕の反対側(左腕側)にカメラがあるため、腕下垂時の RS は身体や足に隠れて捕捉することができない。



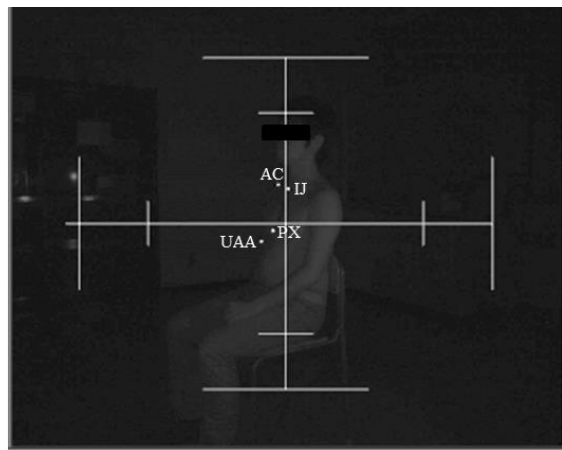
(a) カメラ位置：1，カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5，カメラ高さ：高

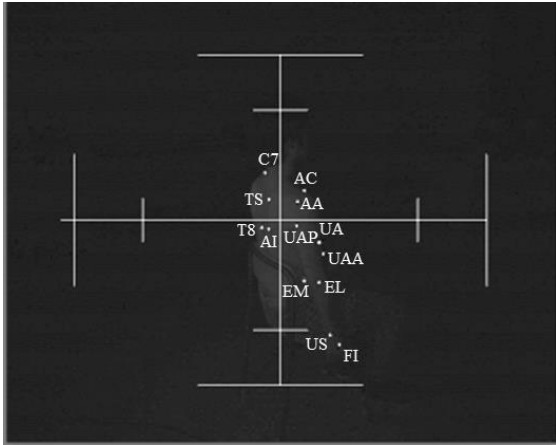


(c) カメラ位置：5，カメラ高さ：中

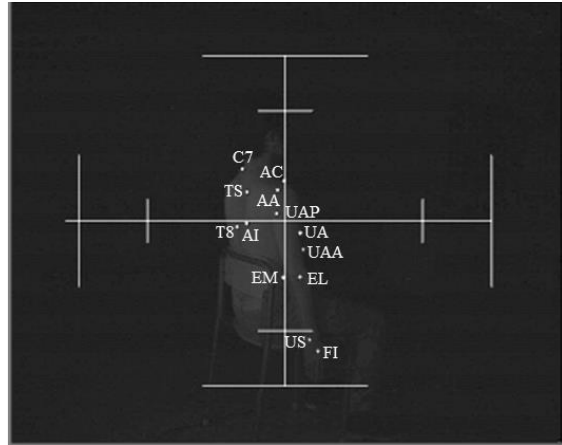


(d) カメラ位置：11，カメラ高さ：中

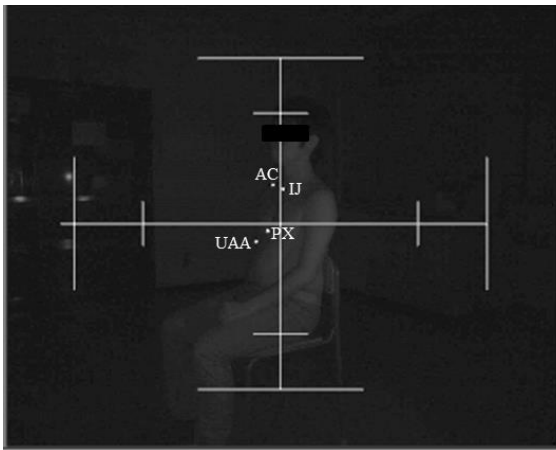
図 4-2 腕下垂での高1-高5-中5-中11の



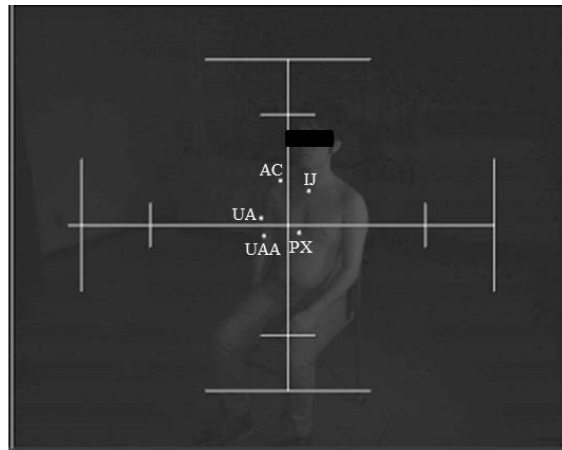
(a) カメラ位置：5，カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5，カメラ高さ：中

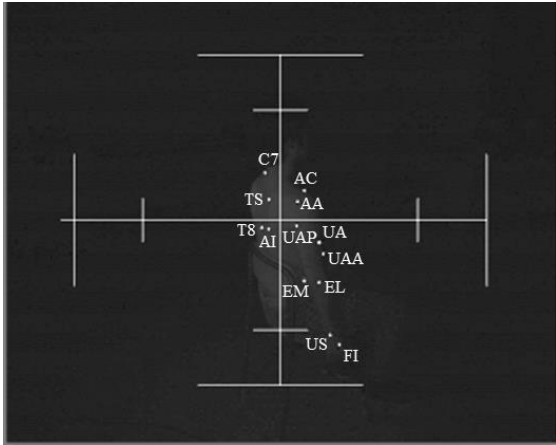


(c) カメラ位置：11，カメラ高さ：中

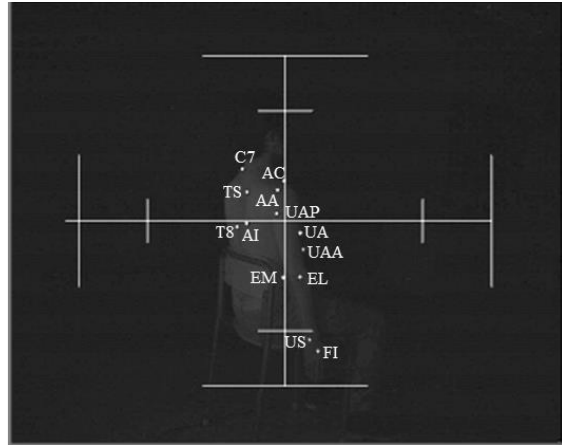


(d) カメラ位置：12，カメラ高さ：高

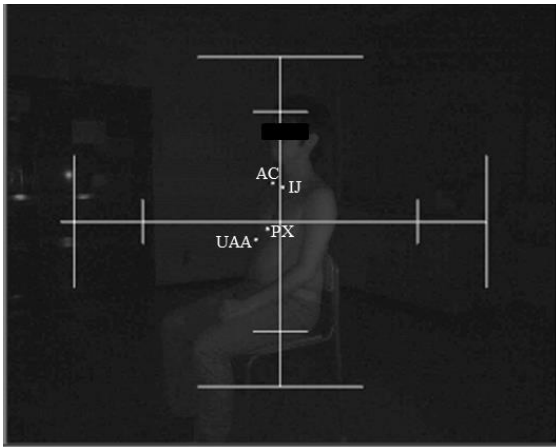
図 4-3 腕下垂での高 5-中 5-中 11-高 12



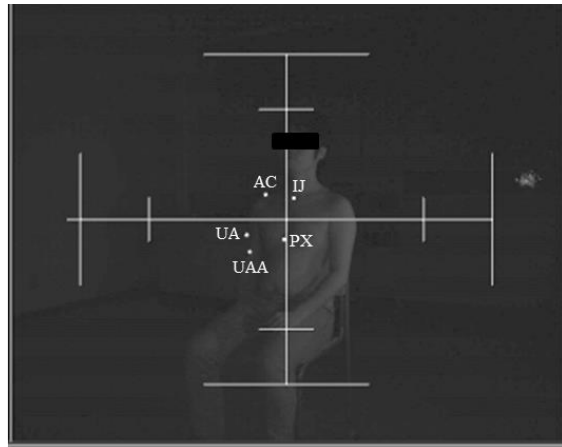
(a) カメラ位置：5，カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5，カメラ高さ：中

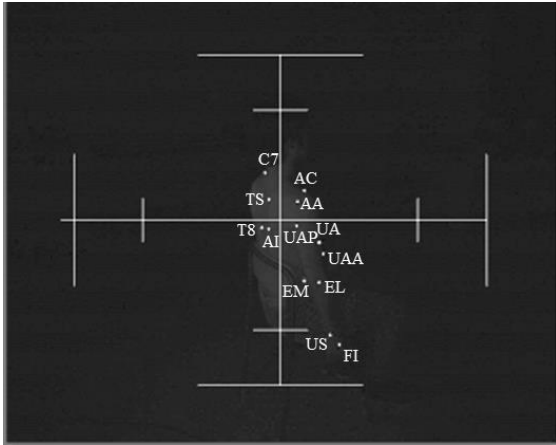


(c) カメラ位置：11，カメラ高さ：中

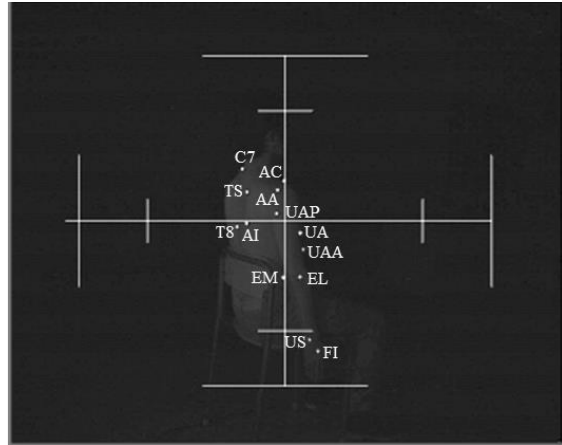


(d) カメラ位置：12，カメラ高さ：中

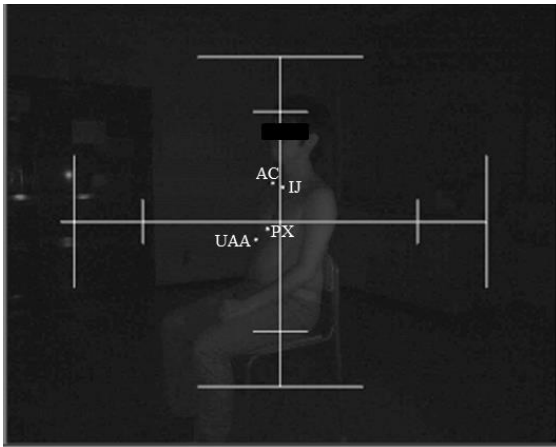
図 4-4 腕下垂での高 5-中 5-中 11-中 12



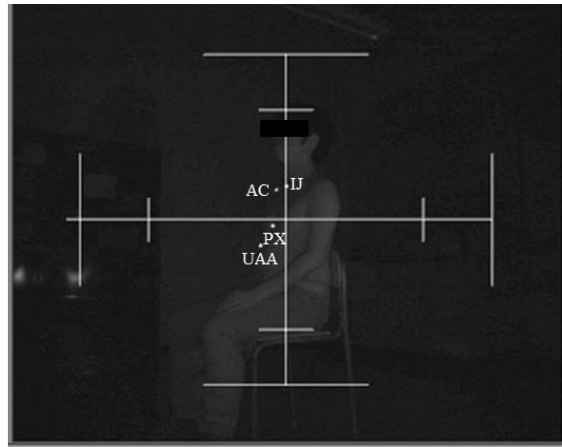
(a) カメラ位置：5，カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5，カメラ高さ：中



(c) カメラ位置：11，カメラ高さ：中



(d) カメラ位置：11，カメラ高さ：低

図 4-5 腕下垂での高 5-中 5-中 11-低 11

表 4-5 腕下垂での高 1-高 5-中 5-中 11

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
1	High	Upper limbs droop along the trunk	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6
5	High		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
11	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4

表 4-6 腕下垂での高 5-中 5-中 11-高 12

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
5	High	Upper limbs droop along the trunk	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
11	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
12	High		○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5

表 4-7 腕下垂での高 5-中 5-中 11-中 12

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
5	High	Upper limbs droop along the trunk	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
11	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
12	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5

表 4-8 腕下垂での高 5-中 5-中 11-低 11

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
5	High	Upper limbs droop along the trunk	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
11	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
11	Low		○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4

(2)机上動作

マーカを最も捕捉できる姿勢の数が多い組み合わせは、高 5-中 5-高 11-中 12 の組み合わせで、11 姿勢であったが、この組み合わせでは、手部位置近位-前腕中間位、手部位置近位-前腕回外位、手部位置反対側-前腕中間位、手部位置反対側-前腕回外位の 4 姿勢でマーカが捕捉できなかった。

手部位置近位-前腕中間位では RS のマーカが高 11 でのみ捕捉できていたが、高 5、中 5、中 12 のカメラでは RS を捕捉できなかった。US のマーカは全てのカメラで捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-6、結果をまとめたものを表 4-9 に示す。手部位置近位-前腕回外位では US のマーカが高 11 のみで捕捉できていたが、高 5、中 5、中 12 のカメラでは US を捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-7、結果をまとめたものを表 4-10 に示す。手部位置反対側-前腕中間位では US のマーカが高 11 のみで捕捉できていたが、高 5、中 5、中 12 のカメラでは US を捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-8、結果をまとめたものを表 4-11 に示す。手部位置反対側-前腕回外位では US と FI のマーカを全てのカメラで捕捉できなかった。ラベル付けを行ったものを図 4-9、結果をまとめたものを表 4-12 に示す。

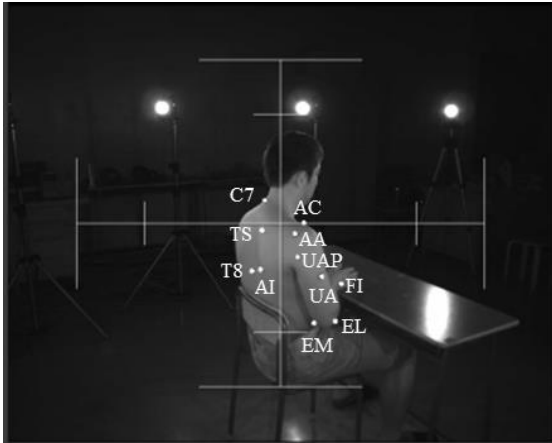
手部位置近位-前腕中間位の場合、RS が高 5、中 5、中 12 のカメラから捕捉できなかったのは、高 5 と中 5 のカメラは図 4-6(a), (b)の通り被験者の後面にあるため、手部位置近位-前腕中間位に身体の前面にあり、被験者の身体に隠れた RS を捕捉することはできなかった。中 12 のカメラは図 4-6(d)の通り被験者の前面にあるが、手部に隠れて捕捉することができなかった。US が全てのカメラから捕捉できなかったのは、RS と同様に高 5 と中 5 のカメラは図 4-6(a), (b)の通り被験者の後面にあるため、手部位置近位-前腕中間位に身体の前面にあり、被験者の身体に隠れた US を捕捉することはできなかった。高 11、中 12 のカメラは図 4-6(c), (d)の通り被験者の前面にあるが、前腕中間位という姿勢から US は手部の下方向(床面方向)にあり、さらに机があることで隠れることとなるため、US を捕捉することができなかった。

手部位置近位-前腕回外位の場合、US が高 5、中 5、中 12 のカメラから捕捉できなかったのは、高 5 と中 5 のカメラは図 4-7(a), (b)の通り被験者の後面にあるため、手部位置近位-前腕回外位に身体の前面にあり、被験者の身体に隠れた US を捕捉することはできなかった。中 12 のカメラは図 4-7(d)の通り被験者の前面にあるが、手部に隠れて捕捉することができなかった。

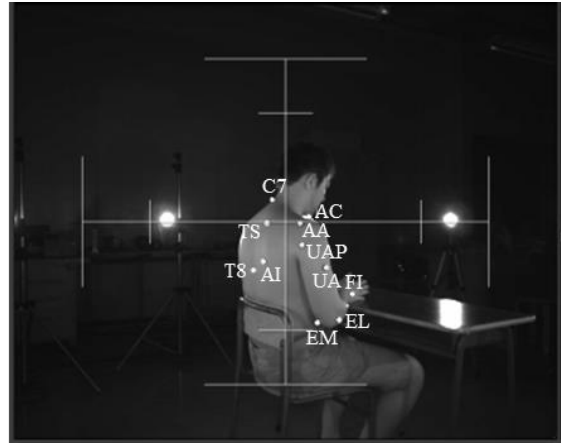
手部位置反対側-前腕中間位の場合、RS が高 5、中 5、中 12 のカメラから捕捉できなかったのは、高 5 と中 5 のカメラは図 4-8(a), (b)の通り被験者の後面にあるため、手部位置近位-前腕回外位に身体の前面にあり、被験者の身体に隠れた US を捕捉することはできなかった。中 12 のカメラは図 4-8(d)の通り被験者の前

面にあるが，手部に隠れて捕捉することができなかった．

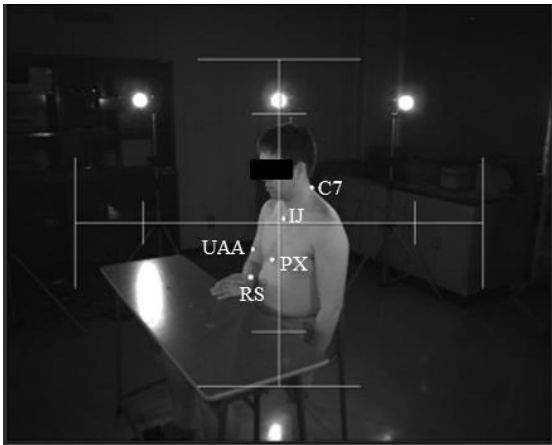
手部位置反対側-前腕回外位の場合，US と FI が全てのカメラから捕捉できなかったのは，高5と中5のカメラは図4-9(a), (b)の通り被験者の後面にあるため，手部位置近位-前腕回外位に身体の前側にあり，被験者の身体に隠れた US を捕捉することはできなかった．高11，中12のカメラは図4-9(c), (d)の通り被験者の前側にあるが，前腕回外位という姿勢から US は被験者の身体方向に，FI は手部の下方向(床面方向)あり，さらに机があることで隠れることとなるため，US, FI を捕捉することができなかった．



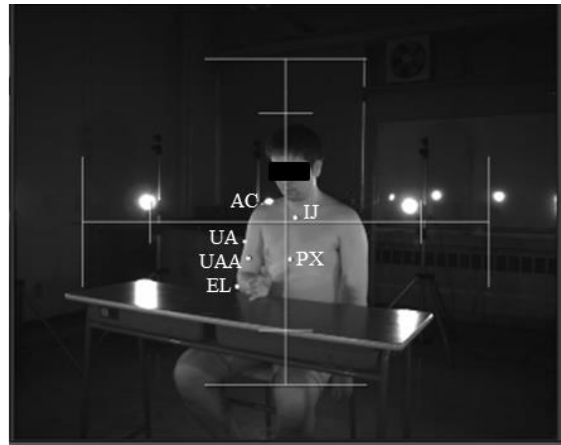
(a) カメラ位置：5，カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5，カメラ高さ：中



(c) カメラ位置：11，カメラ高さ：高



(d) カメラ位置：12，カメラ高さ：中

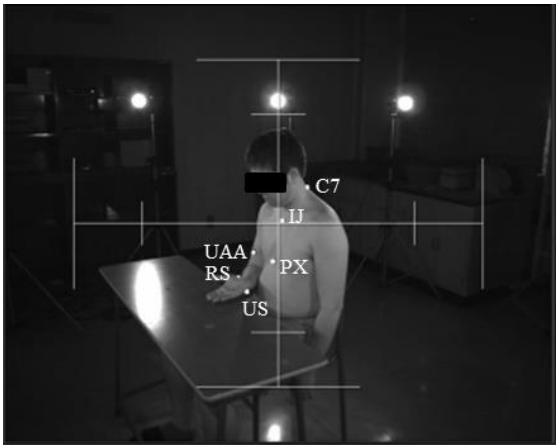
図 4-6 手部位置近位-前腕中間位での高5-中5-高11-中12



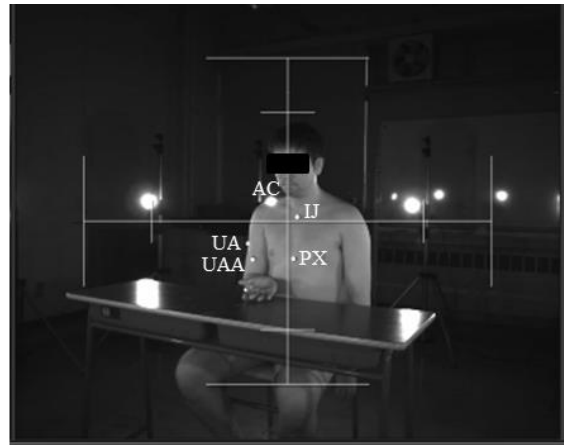
(a) カメラ位置：5，カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5，カメラ高さ：中

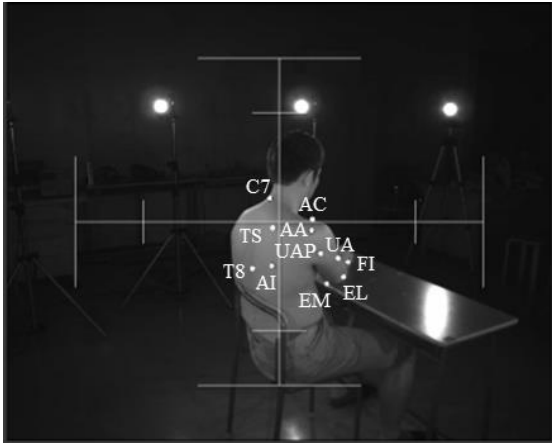


(c) カメラ位置：11，カメラ高さ：高



(d) カメラ位置：12，カメラ高さ：中

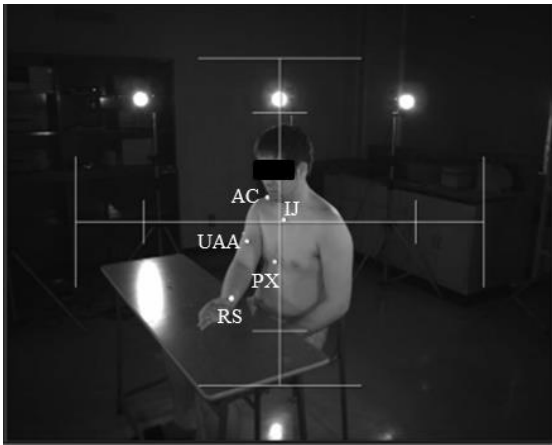
図 4-7 手部位置近位-前腕回外位での高5-中5-高11-中12



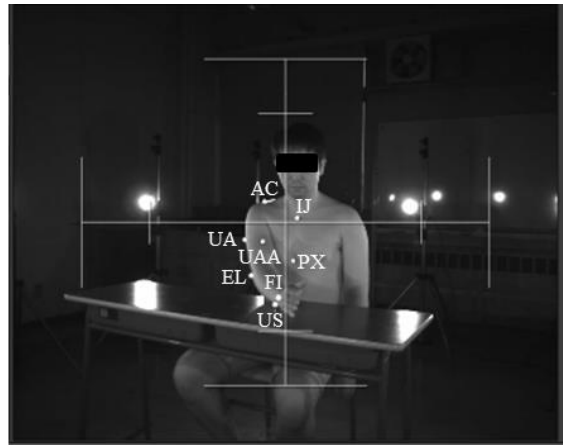
(a) カメラ位置：5，カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5，カメラ高さ：中

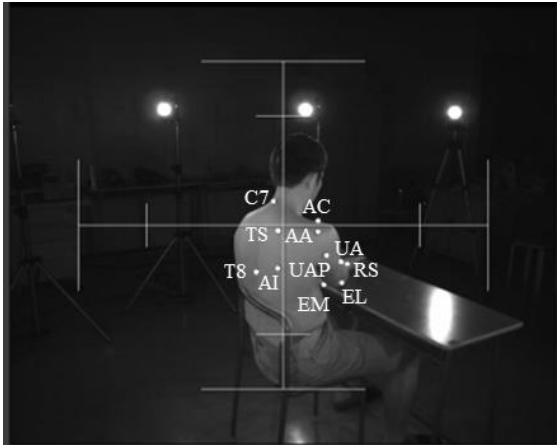


(c) カメラ位置：11，カメラ高さ：高

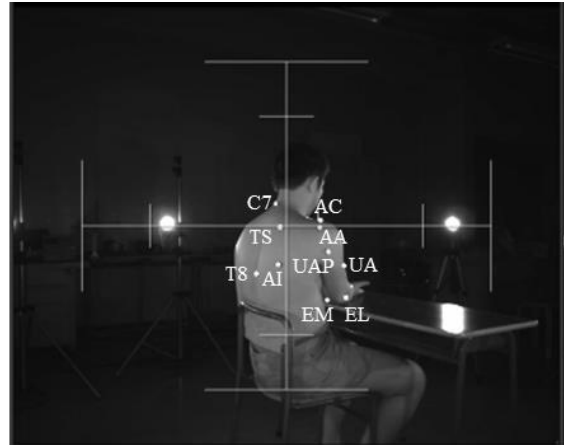


(d) カメラ位置：12，カメラ高さ：中

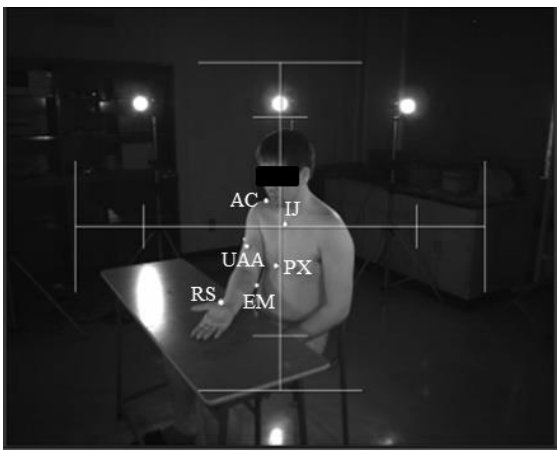
図 4-8 手部位置反対側，前腕中間位での高 5-中 5-高 11-中 12



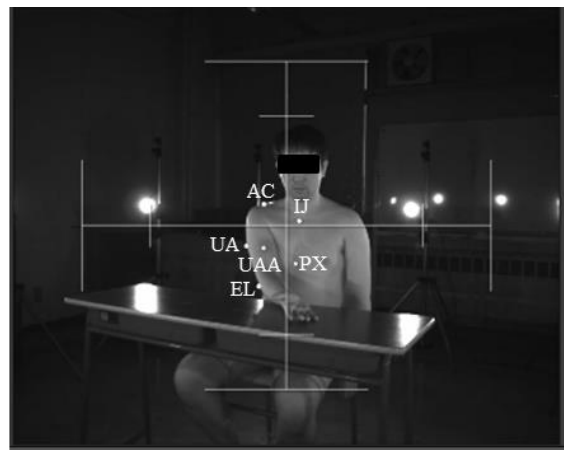
(a) カメラ位置：5, カメラ高さ：高



(b) カメラ位置：5, カメラ高さ：中



(c) カメラ位置：11, カメラ高さ：高



(d) カメラ位置：12, カメラ高さ：中

図 4-9 手部位置反対側-前腕回外位での高5-中5-高11-中12

表 4-9 手部位置近位-前腕中間位での高 5-中 5-高 11-中 12

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
5	High	Hand position proximal side, forearm neutral position	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11
11	High		○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	5
12	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	6

表 4-10 手部位置近位-前腕回外位での高 5-中 5-高 11-中 12

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
5	High	Hand position proximal side, forearm supination	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	12
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	12
11	High		○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	6
12	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5

表 4-11 手部位置反対側-前腕中間位での高 5-中 5-高 11-中 12

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
5	High	Hand position opposite side, forearm neutral position	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
11	High		○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	5
12	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8

表 4-12 手部位置反対側-前腕回外位での高 5-中 5-高 11-中 12

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
5	High	Hand position opposite side, forearm supination	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	11
5	Middle		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
11	High		○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	6
12	Middle		○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	6

4-5 第4章のまとめ

本章では、カメラの位置・高さを変更し、粗大動作と机上動作の異なる姿勢での各カメラからのマーカ捕捉について考察した。

粗大動作では測定した 11 姿勢のうち、10 姿勢を高 1-高 5-中 5-中 11, 高 5-中 5-中 11-高 12, 高 5-中 5-中 11-中 12, 高 5-中 5-中 11-低 11 の 4 つの組み合わせで測定することができた。机上動作では測定した 15 姿勢のうち、11 姿勢を高 5-中 5-高 11-中 12 の組み合わせで測定することができた。

次章からは粗大動作と机上動作をそれぞれに別けて検証を行う。

第 5 章

粗大動作時のカメラ配置の検証

本章では、粗大動作として、肩関節の屈曲動作・外転動作時の測定の精密さの向上を目的とし、品質工学の手法の 1 つであるパラメータ設計を用いて実験的に評価、考察した改善効果について述べる。

5-1 概要

光学式モーションキャプチャのカメラの位置・高さを、パラメータ設計を用いてよりよい条件の組み合わせを推定し、検証する。誤差因子として肩関節の運動方向 2 水準とし、制御因子としてカメラ配置を第 1 項目 3 水準、カメラ高さを第 2~4 項目 3 水準とする。信号因子として測定角度 3 水準とする。直交表 L_9 に割り付けて計 54 試行の実験を行った。マーカは体幹に 4 か所、右上肢に 9 か所皮膚上に設置する。両上肢を体幹に沿って下垂した状態をスタートポジションとし、指定した運動方向・肩関節角度になる動作から、元に戻る動作までを 1 動作として測定した。測定動作時の肩関節角度を光学式モーションキャプチャで測定し、測定結果から SN 比と感度を算出した。結果は、パラメータ設計を用いた実験における最適条件は、各因子の SN 比が最も高い値を示した組み合わせ A_3 (カメラ配置:右腕測定シフト), B_3 (カメラ②高さ:低), C_1 (カメラ③高さ:高), D_1 (カメラ④高さ:高)となった。最適条件と比較条件で確認実験を行ったところ、感度の利得には再現性は確認されなかったが、SN 比の利得は再現性が確認された。

5-2 目的

光学式モーションキャプチャを使用して肩関節の屈曲動作・外転動作を測定する際の、カメラの高さ・位置を直交表実験を用いて最適化する。

5-3 直交表実験

パラメータ設計は、少ない組み合わせの実験で、ばらつきの少ない最適な条件を効率的に導くことのできる方法である⁽⁴²⁾。

光学式モーションキャプチャを使用した動作解析では、身体に設置したマーカを測定することで、マーカの位置を算出する。さらに3点以上のマーカを剛体とすることでオイラー角を算出し、2つの剛体間のオイラー角から相対オイラー角の解析も可能となる。本研究では、上肢動作解析として相対オイラー角を用いて関節角度を算出する。関節角度を算出する際に重要なことは、対象の関節角度と測定関節角度が等しいことである。そこで、光学式モーションキャプチャの基本機能を「身体関節角度に応じた測定関節角度を得る」と定め、入力を動作時の上肢の関節角度なかでも肩関節の屈曲・伸展角度、出力を測定した肩関節屈曲・外転角度とする。この関係はゼロ点比例式として評価する(図 5-1)。この機能の定義の場合、感度 $\beta=1$ が理想となる。

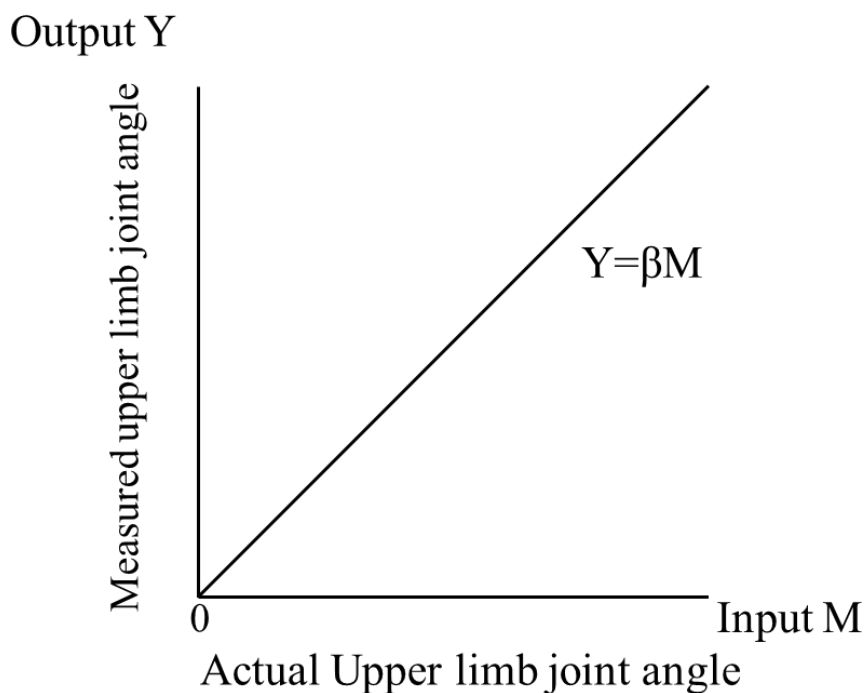


図 5-1 基本機能

5-4 方法

5-4-1 測定条件

光学式モーションキャプチャシステムは三角測量の原理が用いられ⁽²⁷⁾, 1 マーカを 3 次元的に捕捉するには最低 2 台のカメラが必要となる. 本研究では複数マーカを体幹と上肢に設置し, マーカ位置の時間変化を計測しつつ, 代償動作の評価を肩関節の角度変動により行うため, 条件では先行実験にカメラの最小台数が 4 台であることを確認した. そこで, 本実験では, 実験によりカメラ配置を独立変数として, 肩関節角度の精密さと正確さを目的変数として総合的に最大化する設定値の組み合わせを求める.

制御因子としてカメラ 4 台のカメラ相対配置とカメラ高さを 4 項目(因子)とする. 項目に対する設定値を水準と称し, 各項目 3 水準を設けた. 1 項目はカメラの相対配置とした. 4 台のカメラは, 身長 1.7m の被験者の上肢動作ができる限り大きくかつカメラのフレームからはみ出すことなく全て収まる距離を求め, 実験を再現しやすくするため距離の数値を繰り上げ, 被験者を中心に半径 $r=2.00\text{m}$ の円周上に置いた. また, カメラは体中心を通る矢状面の左右に 1 台ずつ計 2 台, 体中心を通る前額面の前後に 1 台ずつ計 2 台となる配置とし, この第 1 水準は, 関連研究の事例を参考とし, 前後左右に対し 45 度をなす方向への配置, そして, 第 2 水準を前後左右の配置とした. これに対し, 第 3 水準は肘に近い上腕骨内側上顆と手関節の橈骨茎状突起に設ける 2 マーカを軸に, 肩関節動作中に前 2 台のカメラのフレームの中央部におさまる配置を, カメラを 15 度間隔で動かし調整する. 後ろ 2 台は鏡像の配置とし, 右腕測定に位置を偏向させた, 4 台のカメラ間の角度が 75, 60, 75 度の間隔とする配置とする. すなわち, カメラ①を正面より左へ 15 度の方向, カメラ②, ③を右に対し ± 30 度の方向, カメラ④を真後ろから左へ 15 度の方向とする. そして図 2-8 中のカメラ①の高さを肩峰からカメラの高さを $h+0.40\text{m}$ とし, カメラ高さを固定する. 第 2~4 項目は, 図 2-8 で示す②~④のカメラ高さとし, カメラの高さを床面から肩峰の高さ h を基準の高さとしこれを第 2 水準(以下, カメラ高さ「中」とする)とする. さらに, カメラの高さを肩峰から $h+0.40\text{m}$ の高さを第 1 水準 (以下, カメラ高さ「高」), 肩峰から $h-0.40\text{m}$ の高さを第 3 水準(以下, カメラ高さ「低」)とする(表 5-1).

誤差因子は上肢動作で可動範囲が最大の肩関節に着目した. 肩関節運動は本来, 上腕肩甲関節と肩甲骨の姿勢角度が合成された複合的な運動であるが⁽³⁴⁻³⁶⁾, 本実験では体幹に対する上腕骨の角度で肩関節の角度を算出する. さらにカメラとマーカの相対位置関係が肩関節の屈曲運動と外転運動の 2 つでは異なるため誤差因子は屈曲方向と外転方向の運動の 2 水準とする(表 5-2). そして, 入力である信号因子は肩関節測定角度とし, 30deg, 70deg, 110deg の 3 水準とする(表

5-3).

本実験は4項目の全てを3水準で設定した多元配置分散分析を行うにあたり、 L_9 直交表実験を行い、各項目と水準の影響を実験の測定値から項目・水準別に平均値を算出しグラフとして並べた要因効果図で分析する。直交表で割り付けた実験は、複数の項目を変化させつつどの項目・水準の組み合わせも同回数だけ実験する。 L_9 へは、カメラ配置と高さである制御因子を A, B, C, D, 肩関節の運動方向である誤差因子を N_1, N_2 , 肩関節測定角度である信号因子を M_1, M_2, M_3 に割り付けた、計 54 条件を No.1 の $y_{111}, y_{112} \dots$ の順番に 1 試行ずつ測定する(表 5-4)。

表 5-1 制御因子の水準値

Control factors	Level 1	Level 2	Level 3
A Camera layout	Quadrant	Sagittal – frontal plane	Right arm shift
B Camera ^② height	High	Medium	Low
C Camera ^③ height	High	Medium	Low
D Camera ^④ height	High	Medium	Low

High: acromion height +0.40m

Medium: acromion height

Low: acromion height -0.40m

表 5-2 誤差因子の水準値

Error factors	Level 1	Level 2
Motion direction	Flexion	Abduction

表 5-3 信号因子の水準値

Signal factors	Level 1	Level 2	Level 3
Shoulder joint angle	30	70	110

表 5-4 直交表 L₉

No.	A	B	C	D	M ₁		M ₂		M ₃	
					N ₁	N ₂	N ₁	N ₂	N ₁	N ₂
1	1	1	1	1	y ₁₁₁	y ₁₁₂	y ₂₁₁	y ₂₁₂	y ₃₁₁	y ₃₁₂
2	1	2	2	2						
3	1	3	3	3						
4	2	1	2	3						
5	2	2	3	1						
6	2	3	1	2						
7	3	1	3	2						
8	3	2	1	3						
9	3	3	2	1	y ₁₉₁	y ₁₉₂	y ₂₉₁	y ₂₉₂	y ₃₉₁	y ₃₉₂

SN 比と感度の計算の手順⁽⁴²⁾を以下に示す.

手順 1 : 線形式 L と有効除数 r の導出.

$$r = M_1^2 + M_2^2 + \cdots + M_k^2 \quad \cdots(5.1)$$

$$L_1 = M_1 y_{11} + M_2 y_{21} + \cdots + M_k y_{k1} \quad \cdots(5.2)$$

手順 2 : 全変動 S_T の導出.

$$S_T = y_{11}^2 + y_{12}^2 + \cdots + y_{k(n-1)}^2 + y_{kn}^2 \quad \cdots(5.3)$$

手順 3 : β の変動 S_β の導出.

$$S_\beta = \frac{(L_1 + L_2 + \cdots + L_n)^2}{nr} \quad \cdots(5.4)$$

手順 4 : 誤差因子 N の変動 S_{N×β} の導出.

$$S_{N \times \beta} = \frac{L_1^2 + L_2^2 + \cdots + L_n^2}{r} - S_\beta \quad \cdots(5.5)$$

手順 5 : 誤差変動 S_e の導出.

$$S_e = S_T - S_\beta - S_{N \times \beta} \quad \cdots(5.6)$$

手順 6 : 誤差分散 V_e の導出.

$$V_e = \frac{S_e}{kn-n} \quad \dots(5.7)$$

手順 7 : 総合誤差分散 V_N の導出.

$$V_N = \frac{S_N}{kn-1} \quad \dots(5.8)$$

手順 8 : SN 比と感度の導出.

$$\text{SN 比 } \eta = 10\log \frac{\beta^2}{\sigma^2} = 10\log \frac{\frac{1}{nr}(S_\beta - V_e)}{V_N} \quad (\text{db}) \quad \dots$$

(5.9)

$$\text{感度 } S = 10\log \beta^2 = 10\log \left[\frac{1}{nr} (S_\beta - V_e) \right] \quad (\text{db}) \quad \dots(5.10)$$

5-4-2 測定動作

測定対象動作は肩関節屈曲動作と外転動作とする(図 5-2)。被験者には椅子に深く腰掛け、背もたれに背を付け、体幹の前後・側屈がなく、両上肢を体幹に沿って下垂した状態をスタートポジションとする。スタートポジションから指定した運動方向・肩関節角度になる動作から、元に戻る動作までを 1 動作として測定する。動作は被験者の自然なスピードとし、測定前に十分練習を行った。指定した角度への運動は、測定前に角度計を用いて測定し、被験者が指定した角度へ運動したときに、目視で対象物に合せるという方法を用いて再現する。試行回数は各条件で 1 回とする。

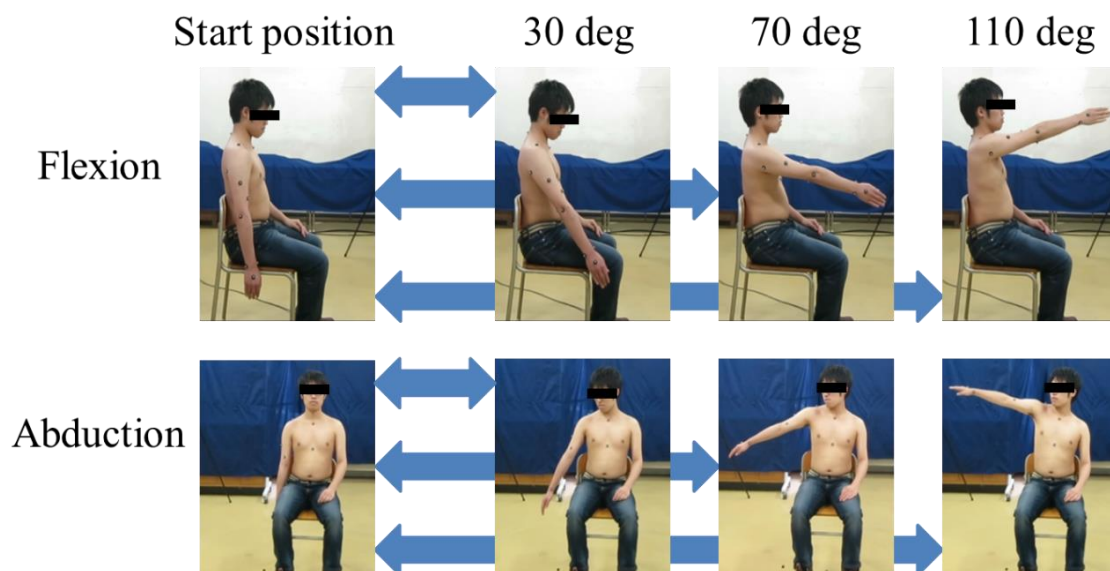


図 5-2 測定動作

5-5 結果・考察

本実験は東京電機大学ヒト生命倫理委員会の承認を受け(前述), 被験者への事前説明を行い, 同意を得て実施した. 被験者は, 上肢の運動・感覚機能に既往歴のない右利き健常成人男性 1 名(年齢 21 歳, 身長 1.65m, 体重 70kg)とした.

5-5-1 結果

基本機能の理想的な入出力関係は, 0 点を通る比例関係になることからパラメータ設計の式(5.1)~(5.10)を使用して, 測定結果から SN 比と感度を算出する. SN 比は各因子の出力のばらつき, すなわち精密度さに与える影響, 感度は各因子の入出力特性に与える影響, すなわち理想的な特性との差, いわゆる正確差を表す. 本実験で対象とする光学式モーションキャプチャでは, SN 比は大きいほど望ましく, 入出力の比は 1 が理想であることから感度は 0db が理想値となる. SN 比の要因効果図を図 5-3 に, 感度の要因効果図を図 5-4 に示す.

SN 比の要因効果図では, 項目 A のカメラ配置では, 四隅である A_1 が -21.5db, 前後左右である A_2 が -18.0db, 右腕測定シフトである A_3 が -17.7db であり, A_3 は他の 2 水準より顕著に小さかった. 項目 B のカメラ②の高さでは, 肩峰の高さ $h+0.40m$ である B_1 が -20.6db, 肩峰の高さ h である B_2 が -19.6db, 肩峰の高さ $h-0.40m$ である B_3 が -17.0db と他の 2 水準より大きかった. 項目 C はカメラ③の高さで, 肩峰の高さ $h+0.40m$ である C_1 が -18.9db, 肩峰の高さ h である C_2 が -19.2db, 肩峰の高さ $h-0.40m$ である C_3 が -19.1db であり, 3 水準で明確な差はなかった. 項目 D はカメラ④の高さで, 肩峰の高さ $h+0.40m$ である D_1 が -18.3db, 肩峰の高さ h である D_2 が -19.1db, 肩峰の高さ $h-0.40m$ である D_3 が -19.8db であり, C のカメラ③の高さよりも差はあり, カメラを高く取り付けるに応じて SN 比は小さくなる傾向があった. A のカメラ配置と B のカメラ②高さが SN 比の出力に大きく影響を及ぼすことが確認された. C のカメラ③高さと D のカメラ④高さは SN 比の出力に及ぼす影響は小さいと確認された.

感度の要因効果図では, 項目 A のカメラ配置では, 四隅である A_1 が -3.5db, 前後左右である A_2 が -3.6db, 右腕測定シフトである A_3 が -3.4db であった. 項目 B のカメラ②の高さでは, 肩峰の高さ $h+0.40m$ である B_1 が -3.7db, 肩峰の高さ h である B_2 が -3.5db, 肩峰の高さ $h-0.40m$ である B_3 が -3.4db であった. 項目 C はカメラ③の高さで, 肩峰の高さ $h+0.40m$ である C_1 が -3.5db, 肩峰の高さ h である C_2 が -3.2db, 肩峰の高さ $h-0.40m$ である C_3 が -3.9db であった. 項目 D はカメラ④の高さで, 肩峰の高さ $h+0.40m$ である D_1 が -3.4db, 肩峰の高さ h である D_2 が -3.4db, 肩峰の高さ $h-0.40m$ である D_3 が -3.8db であった. ただし, 全項目・水準の感度の結果は -3.2~-4 の範囲にあり, SN 比の変動の幅と比べると小さい. このことから, 各水準間の差は十分小さく, 基本機能の入力と出力が 1:1 の理想関係にあるとするなら感度は 0 が理想であり, これから極端に大きく外れて

いないので、解析結果としても妥当と言える。よって、SN比と感度の要因効果図からは、項目ならびに水準に対する考察は、SN比を用いるのが妥当で、感度の水準間の差については考慮しなくても影響は小さいと言える。

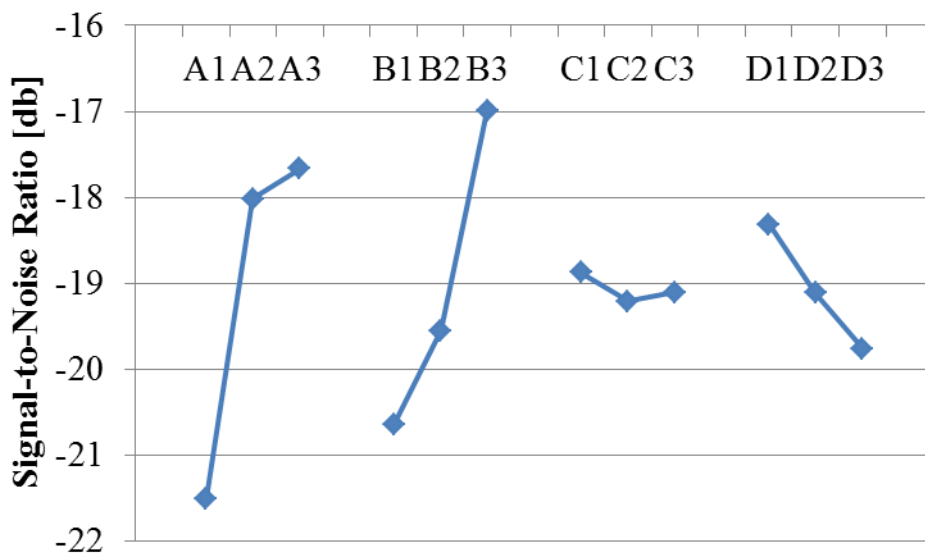


図 5-3 SN比

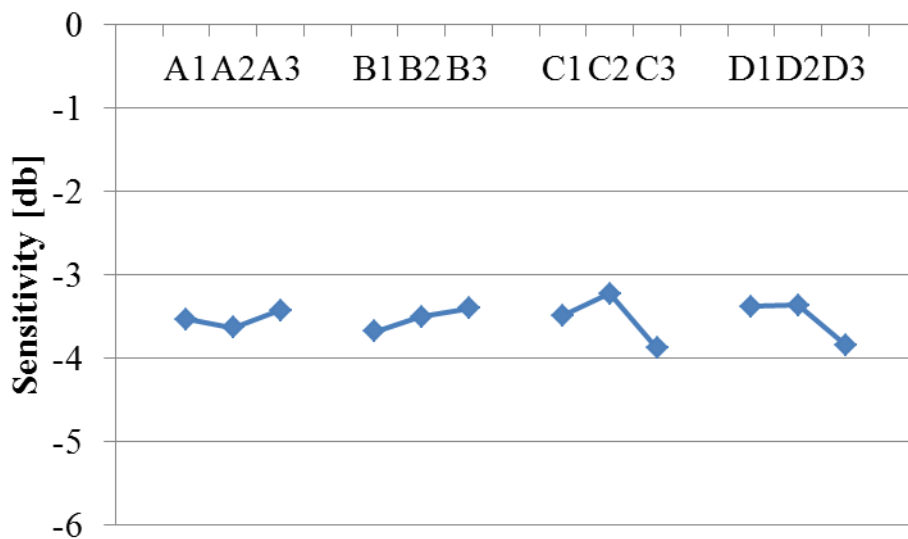


図 5-4 感度

5-5-2 考察

得られた結果から本研究での最適条件を決定する。最適条件の決定方法は、2段階設計法⁽⁴²⁾を用いる。まず、1段階でSN比が最大になる制御因子の水準の組み合わせを選択する。次に、2段階で感度は $\beta=1$ となるよう0に近い値をとる水準を選択する。本研究では、感度の影響は因子間での違いは十分小さいとして、1段階の、各因子のSN比が最大になる組合せを最適条件とする。この結果、最適条件は、各因子のSN比が最も高い値を示した組み合わせカメラ配置：右腕測定シフト(A₃)、カメラ②高さ：低(B₃)、カメラ③高さ：高(C₁)、カメラ④高さ：高(D₁)とした。

5-6 確認実験

5-6-1 最適条件と比較条件の決定

直交表実験の結果から、設定した条件であるカメラ4台、マーカ13個による光学式モーションキャプチャでの肩関節運動角度の測定におけるカメラ配置の最適条件の組み合わせはカメラ配置:右腕測定シフト(A₃), カメラ②高さ:低(B₃), カメラ③高さ:高(C₁), カメラ④高さ:高(D₁)とであった。直交表実験と分析では、設定した因子の組み合わせと範囲は実使用条件の組み合わせの一部の標本を用いて最適な条件を推測する。誤差因子として結果のばらつきと偏りを生じる要因を人為的に付加した実験、分析であるため、システムの基本機能である測定に再現性があるかを実験により検証する。この確認実験では、制御因子の設定を最適条件と比較対象として従来の一般的な設定カメラ配置:四隅(A₁), カメラ②高さ:高(B₁), カメラ③高さ:高(C₁), カメラ④高さ:高(D₁)の2条件で測定実験を行った。最適条件と比較条件のカメラ配置と各カメラ高さを図5-5に示す。

5-6-2 実験方法

確認実験では、信号因子と誤差因子は直交表実験で用いた条件をそのまま踏襲し行う。そのため、誤差因子は肩関節の屈曲方向の運動と外転方向の運動の2水準(表5-2), 信号因子は測定角度30deg, 70deg, 110degの3水準(表5-3)とする。使用した計測機器, マーカの取り付け位置, 被検者, およびSN比と感度の算出式などについても前述の条件と同じとする。

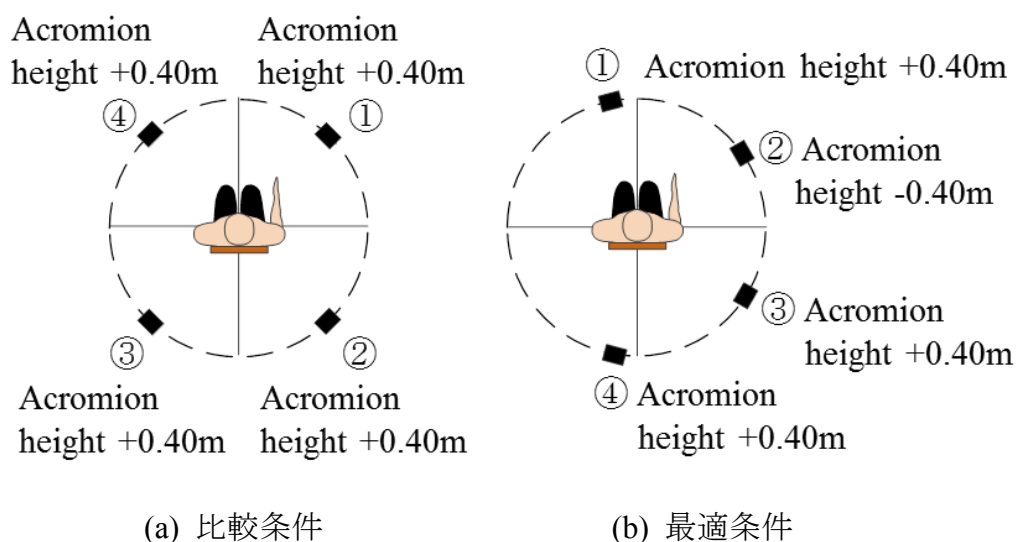


図 5-5 最適条件と比較条件

5-6-3 結果・考察

(1)結果

前実験での測定結果から算出した各項目・水準の SN 比と感度から，最適条件と比較条件の制御因子各々の組み合わせ式(5.11)～(5.16)を使用して，推定 SN 比 -14.7db と -22.1db，ならびに推定感度 -3.1db と -3.5db を算出した．さらに，最適条件と比較条件の推定 SN 比，推定感度の差を各々の利得として式(5.17),(5.18)を使用して推定利得 7.5db と 0.4db，ならびに確認実験での各信号因子の測定結果から最適条件と比較条件の SN 比と感度を求め推定利得 7.1db と 0.0db を算出した(表 5-5)．なお，ここで利得とは，比較条件と最適条件の差であり，比較条件と比べて最適条件でどのくらい改善されたかを示す量である．

推定値の式

直交表実験全体の SN 比の平均

$$T [\eta] = \frac{\eta_1 + \eta_2 + \eta_3 + \eta_4 + \eta_5 + \eta_6 + \eta_7 + \eta_8 + \eta_9}{9} \quad \dots(5.11)$$

直交表実験全体の感度の平均

$$T [S] = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + S_9}{9} \quad \dots(5.12)$$

最適条件の SN 比

$$\eta_{Opt} = \eta_{A3} + \eta_{B3} + \eta_{C1} + \eta_{D1} - 3T [\eta] \quad \dots(5.13)$$

比較条件の SN 比

$$\eta_{Rel} = \eta_{A1} + \eta_{B1} + \eta_{C1} + \eta_{D1} - 3T [\eta] \quad \dots(5.14)$$

最適条件の感度

$$S_{Opt} = S_{A3} + S_{B3} + S_{C1} + S_{D1} - 3T [S] \quad \dots(5.15)$$

比較条件の感度

$$S_{Rel} = S_{A1} + S_{B1} + S_{C1} + S_{D1} - 3T [S] \quad \dots(5.16)$$

利得の推定式

$$\text{SN 比 } \Delta\eta = \eta_{Opt} - \eta_{Rel} \quad \dots(5.17)$$

$$\text{感度 } \Delta S = S_{Opt} - S_{Rel} \quad \dots(5.18)$$

表 5-5 再現性の確認

Condition	Estimate		Experimental	
	S/N Ratio	Sensitivity	S/N Ratio	Sensitivity
Optimum [db]	-14.7	-3.1	-14.0	-3.7
Relation [db]	-22.1	-3.5	-21.1	-3.7
Gain [db]	7.5	0.4	7.1	0.0

(2)考察

選択した最適条件で測定を行う上で肩関節運動の方向の影響を受けず再現性が高いかは、推定した利得と確認実験の測定結果から算出した利得を比較した差が $\pm 30\%$ の範囲内にあるかによって判断される。推定値の SN 比の利得は 7.5、感度は 0.4 であるため、SN 比は 5.25~9.75、感度は 0.28~0.52 の範囲内となり、確認実験値の SN 比の利得は 7.1、感度は 0.0 であるから SN 比は、 $\pm 30\%$ の範囲内にあるが、感度は $\pm 30\%$ の範囲外となった。このことから、求めた制御因子の組み合わせでカメラ 4 台を配置し、マーカ 13 個を取り付けた測定環境においては、作業療法訓練中の代償動作の肩関節運動は、その方向が屈曲・伸展と外転・内転の単純方向でなく複合であっても影響を受けることが少ない測定が可能であることを示す。

この最適条件を導出した直交実験、ならびに確認実験においても被検者は 1 名であったことから、本結果の有効性の範囲は被検者の体格が大きく異なる場合においては未知となる。カメラ高さの設定を肩峰からの高さを基準としたことで、身長の影響を顕著に受けることはないと推測するが、腕の周囲径などの影響は受け易いと考えられ、測定結果の確かさを担保するためには、被験者の体格を誤差因子として追加し、この実験データを直交表実験の結果に加えて分析すれば、カメラの最適な設定条件は導出可能であると考えられる。測定対象の関節が肘関節運動や前腕の回内外運動などに変わる場合や追加される場合、ならびにマーカの数の追加・削減や取付け位置が変更される場合は、前述のデータの追加と再分析で最適条件の導出・確認実験で再現性が担保されるかについては、今後検証が必要である。

5-7 第5章のまとめ

本章では、粗大動作である肩関節屈曲と肩関節外転の最適なカメラ位置・高さについてパラメータ設計を用いて実験し考察した。

その結果、パラメータ設計を用いた実験における最適条件は、各因子のSN比が最も高い値を示した組み合わせ A₃(カメラ配置：右腕測定シフト), B₃(カメラ②高さ：低), C₁(カメラ③高さ：高), D₁(カメラ④高さ：高)となった。最適条件と比較条件で確認実験を行ったところ、感度の利得には再現性は確認されなかったが、SN比の利得は再現性が確認された。

第 6 章

机上動作時のカメラ配置の検証

本章では、STEF 使用時の光学式モーションキャプチャのカメラ位置・高さを従来の条件と提案した条件での比較について述べる。

6-1 概要

被験者は上肢の運動・感覚機能に既往歴のない右利き健常成人男性1名とし、光学式モーションキャプチャの異なるカメラの位置・高さの条件でSTEFを用いて静的な測定を行った。測定条件は、カメラ位置が四隅、前後左右、高5-中5-高11-中12の3条件とする。マーカは体幹に4か所、肩甲骨に3か所、右上肢に9か所、皮膚上に設置する。測定動作は、STEFの検査10項目とし、被験者には椅子に深く腰掛け、背もたれに背を付け、体幹の前後・側屈がない状態で各項目の測定動作位置まで動作を行い、静止した状態で撮影を行った。データ処理は、各測定条件のカメラ位置、各測定動作で撮影された図内で、認識できるマーカを目視でラベル付けを行った。

6-2 目的

第4章で行った机上動作での測定の結果、測定した15姿勢のうち11姿勢が測定できる組み合わせの高5-中5-高11-中12が、測定空間内に均等に設置した四隅、前後左右と比較して有効であるかをSTEFを用いて検証することを目的とする。

6-3 方法

6-3-1 測定条件

比較する測定条件は、測定空間内に均等に設置⁽⁸⁾した四隅と前後左右の2条件と第3章の机上動作での測定で最も認識できる姿勢の多組み合わせである高5-中5-高11-中12の1条件、計3条件とする(図6-1)。四隅と前後左右のカメラ高さは4台全て肩峰高さ+0.40mとした。高5-中5-高11-中12のカメラ高さは、5に肩峰高さ+0.40mのカメラ1台と肩峰高さのカメラ1台、11に肩峰高さ+0.40mのカメラ1台、12に肩峰高さのカメラ1台とする。

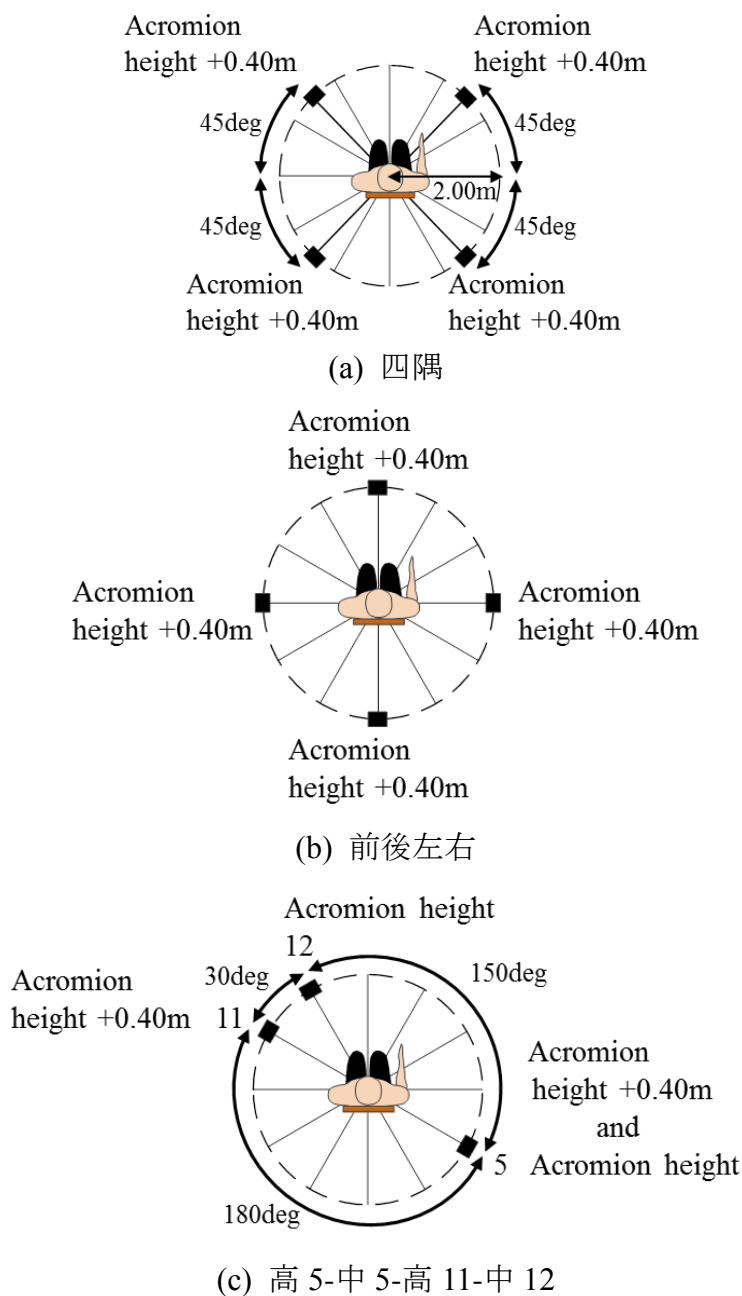


図6-1 カメラ位置・高さ

6-3-2 測定動作

測定対象動作は STEF の 10 検査(図 6-2)とし、各検査のスタートポジション、把持姿勢、把持したものを移動した姿勢などに分け、計 45 項目とする。図 6-3 に検査 1(大球)の例を示す。各検査での動作の詳細は、付録の図 A-1～A-10 に記す。被験者には椅子に深く腰掛け、背もたれに背を付け、体幹の前後・側屈がない状態で各項目の測定動作位置まで動作を行い、静止した状態で撮影を行った。



図 6-2 簡易上肢機能検査

例) 検査 1 (大球)



図 6-3 検査 1 (大球)での測定動作

6-4 結果・考察

本研究は東京電機大学ヒト生命倫理委員会の承認を受け(前述), 被験者への事前説明を行い, 同意を得て実施した. 被験者は上肢の運動・感覚機能に既往歴のない右利き健常成人男性 1 名(年齢: 22 歳, 身長: 1.73m, 体重: 80kg)とした.

6-4-1 結果

STEF の 10 検査を 45 項目に分けて, 16 か所のマーカ全てが最低 2 か所以上認識できたものを○, 認識できなかったものを×とする(表 6-1).

四隅では, 45 項目のうち 14 項目で測定することができた. 前後左右では, 45 項目のうち 6 項目で測定することができた. 高 5-中 5-高 11-中 12 では, 45 項目のうち 38 項目で測定することができた.

表 6-1 10 検査 45 項目の結果

Test	Posture	Four corners	Front, back, left and right	High 5-Middle 5- High 11-Middle 12
1	Start position	×	×	○
	Grasping position	×	×	○
	Transfer position	×	×	○
2	Start position	×	×	○
	Hand position opposite - proximal side, grasping position	×	×	×
	Hand position same - proximal side, grasping position	○	×	○
3	Transfer position	×	×	○
	Start position	×	×	○
	Hand position opposite - distal side, grasping position	○	×	×
4	Hand position opposite - proximal side, grasping position	×	×	×
	Hand position same - distal side, transfer position	×	×	○
	Hand position same - proximal side, transfer position	×	×	○
5	Start position	×	×	○
	Hand position same - distal side, grasping position	○	○	○
	Hand position same - proximal side, grasping position	×	×	○
	Hand position opposite - proximal side, transfer position	×	×	×
6	Hand position proximal side, transfer position	○	×	○
	Start position	×	×	○
	Hand position same - proximal side, grasping position	○	×	○
	Hand position opposite - proximal side, transfer position	×	○	×
7	Hand position proximal side, transfer position	○	×	○
	Start position	×	×	○
	Hand position same - distal side, grasping position (forearm pronation)	○	×	○
	Hand position same - distal side, grasping position (forearm neutral position)	○	×	○
8	Hand position same - distal side, grasping position (forearm supination)	○	×	○
	Hand position opposite - proximal side, grasping position (forearm pronation)	×	×	×
	Hand position opposite - proximal side, grasping position (forearm neutral position)	○	×	○
	Hand position opposite - proximal side, grasping position (forearm supination)	×	×	×
9	Start position	×	×	○
	Hand position same - proximal side, grasping position	×	×	○
	Hand position opposite - proximal side, grasping position	×	×	○
10	Hand position distal side, transfer position	×	○	○
	Start position	×	×	○
	Grasping position	×	○	○
Total	Transfer position	○	×	○
	Start position	×	×	○
	Hand position same - proximal side, grasping position	○	×	○
	Hand position opposite - proximal side, grasping position	×	×	○
Total	Hand position same - distal side, transfer position	×	×	○
	Hand position opposite - distal side, transfer position	×	○	○
Total		14	6	38

6-4-2 考察

表 6-1 の結果から，各検査内の項目が全て測定可能な場合を，その検査をはじめから終わりまで測定が可能とし○，検査内の項目のうち，1 つでも×がついたものは，測定が不可能して×とした(表 6-2)．四隅，前後左右ともに 10 検査全てで測定が不可能であった．高 5-中 5-高 11-中 12 では，10 検査の内 5 検査で始めから終わりまで測定可能であった．

表 6-2 測定可能な検査

Test	Four corners	Front, back, left and right	High 5-Middle 5- High 11-Middle 12
1	×	×	○
2	×	×	×
3	×	×	×
4	×	×	×
5	×	×	○
6	×	×	×
7	×	×	×
8	×	×	○
9	×	×	○
10	×	×	○
Total	0	0	5

6-5 第6章のまとめ

本章では、第4章で測定した机上動作の結果から STEF を用いて机上動作に最適なカメラ位置・高さについて考察した。

STEF の 10 検査を 45 項目に分けて、静的に測定を行った結果、四隅では、45 項目のうち 14 項目、前後左右では、45 項目のうち 6 項目、高 5-中 5-高 11-中 12 では、45 項目のうち 38 項目で測定することができた。この結果からさらに各検査が一貫して測定出るかを見ると、四隅、前後左右ともに 10 検査全てで測定が不可能であったが、高 5-中 5-高 11-中 12 では、10 検査の内 5 検査で始めから終わりまで測定可能であった。

第 7 章

結論

本研究では、肩関節動作の評価を目的とした上肢用光学式モーションキャプチャの開発をするため実験を行った。以下に各章の結論をまとめる。

第1章

光学式モーションキャプチャの研究背景と課題について示した。

第2章

モーションキャプチャの種類や光学式モーションキャプチャの計測原理、設定について紹介した。

第3章

光学式モーションキャプチャの計測精度に与える要因として、骨とマーカ間の誤差要因に着目して、皮膚上とコンプレッションウェア上に設置したマーカの変位と肩甲骨角度の特徴を確認した。

第4章

光学式モーションキャプチャの計測精度に与える要因として、マーカとカメラ間の誤差要因に着目して、カメラの位置・高さを変更したときの粗大動作と机上動作のマーカの捕捉の違いについて検証し、それぞれの動作で異なるカメラの位置・高さが測定に有利であると確認した。

第5章

粗大動作の測定に着目し、パラメータ設計を用いて従来の測定条件と提案した測定条件を比較した。その結果、カメラ配置：右腕測定シフト、カメラ②高さ：低、カメラ③高さ：高、カメラ④高さ：高の条件で、従来の測定条件と比較して、SN比の再現性が確認で高い結果となった。

第6章

机上動作の測定に着目し、STEFを用いて従来の測定条件と提案した測定条件を比較した。その結果、カメラ位置5：高、カメラ位置5：中、カメラ位置11：高、カメラ位置12：中の条件で、STEFの10検査中5検査で測定が可能となった。

以上がこの研究で得られた結論である。本研究では、光学式モーションキャプチャの誤差要因を、動作をしてマーカが変位するまでの間に考えられる要因として「骨とマーカ間の誤差要因」、マーカの変位から光学式モーションキャプチャがマーカを捉えるまでの間に考えられる要因として「マーカとカメラ間の誤差要因」に分類をして実験を行った。「骨とマーカ間の誤差要因」では、皮膚上とコンプレッションウェア上に設置したマーカの変位と肩甲骨角度の特徴を確認することで、コンプレッションウェア上のマーカ誤差を補正し、関節角度変位を算出できる可能性を示した。「マーカとカメラ間の誤差要因」では、カメラの位置・高さ

を変更したときの粗大動作と机上動作の 2 つの異なる動作でのマーカ捕捉の違いについて検証することで、粗大動作と机上動作ではそれぞれに適したカメラ位置・高さを示した。今回分類した 2 つの誤差要因以外にも、測定時の誤差要因として測定対象者の身長や軟部組織の多い・少ないなどの身体的特徴、把持対象物の重量や形状などの訓練に使用する対象物の特徴やデータ処理・解析時の誤差要因としてマーカ補完方法や関節角度の計算方法など、さまざまな誤差要因を複合した条件で測定し、検証することが今後の課題である。

現在日本での上肢切断者の筋電義手使用率は低く⁽⁴³⁻⁴⁵⁾、諸外国では高い値を示しているが⁽⁴⁶⁻⁴⁹⁾、原因の 1 つに筋電義手の訓練を行える施設が少ないこと⁽⁵⁰⁾があげられる。筋電義手の訓練を行える施設が少ないということは、適切に訓練を行える作業療法士も限られている⁽⁵¹⁾。筋電義手の訓練では、義手の操作訓練、基本操作訓練から日常生活訓練など作業療法士による動作の観察、評価、指導が必要⁽⁶⁾となるが、評価ポイントが義手の誤動作や動作のタイミング⁽⁷⁾、肩関節の外転・内旋位による不自然な姿勢⁽³⁾など多岐に渡るため、被訓練者へのフィードバックは、作業療法士の経験や技量に依存するところが多くなる。また、作業療法士間、医師や義肢装具士などの他職種との情報共有や技術伝達には、ビデオカメラを用いて撮影した画像を使用する機会が多いが、ビデオカメラの画像では視点が固定されるため、知識や経験の差によって理解度に差が生じる。これに対し、本研究で構築された光学式モーションキャプチャを用いた測定環境を使用することで、3 次元的な動作の測定、再生が可能となり理解しやすさは大きく向上する。さらに今後臨床現場へ導入するには、測定したデータから各関節角度データや腕の軌跡、速度などのデータの自動算出や、本人の訓練前後の比較や過去の動作の上手な人との比較などが行えるようになれば、作業療法士によるデータ解析時間を短縮することができ、測定後すぐに被訓練者へのフィードバックが可能となる。これらのデータは、筋電義手を製作する義肢装具士にとっても、従来の基準で製作した筋電義手の義手長や手継手の角度、ソケットのトリミングラインなどを、測定した動作データをもとに筋電義手使用者に合わせて再設定することで、調整の質の向上につながる。

参考文献

- (1) 関川伸哉, 山本澄子, 菅野重樹, 大腿義足膝継手の機械特性と義足歩行との関連性-流体制御方式と定摩擦方式膝継手を用いて-. バイオメカニズム 1996; 13: 279-290.
- (2) 山本澄子, 脳血管障害の歩行分析. 理学療法科学 2002; 17(1): 3-10.
- (3) Carey, S.L., Highsmith, M.J., Maitland, M.E., Dubey, R.V., Compensatory movements of transradial prosthesis users during common tasks. *Clinical Biomechanics* 2008; 23(9): 1128–1135.
- (4) Carey, S.L., Dubey, R.V., Bauer, G.S., Highsmith, M.J., Kinematic comparison of myoelectric and body powered prostheses while performing common activities. *Prosthetics and Orthotics International* 2009; 33(2): 179–186.
- (5) 森田千晶, 山本澄子, 片側上肢切断が姿勢に及ぼす影響について. 日本義肢装具学会誌 2007; 23(1): 75-82.
- (6) 溝部二十四, 陳隆明, 柴田八衣子, 大庭潤平, 義手の評価方法のポイントと指導のコツ: 筋電電動義手. 日本義肢装具学会誌 2013; 29(4): 240-245.
- (7) 大庭潤平, 陳隆明, 柴田八衣子, 溝部二十四, 古川宏, 義手に関する評価法—日本と世界の動向—. 日本義肢装具学会誌 2013; 29(4): 222-226.
- (8) Gløersen Ø., Federolf P., Predicting Missing Marker Trajectories in Human Motion Data Using Marker Intercorrelations. *PLoS One* 2016; 11(3): e0152616.
- (9) Begon M., Wieber P-B., Yeadon MR. Kinematics estimation of straddled movements on high bar from a limited number of skin markers using a chain model. *Journal of Biomechanics* 2008; 41(3):581–586.
- (10) Howarth S.J., Callaghan J.P., Quantitative assessment of the accuracy for three interpolation techniques in kinematic analysis of human movement. *Computer Methods Biomechanics and Biomedical Engineering* 2010; 13(6):847–855.
- (11) 江原義弘, 使いたい VICON. バイオメカニズム学会誌 2008; 32(2): 107-111.
- (12) Safaee-Rad R., Shwedyk E., Quanbury A.O., Cooper J.E., Normal Functional Range of Motion of Upper Limb Joints During Performance of Three Feeding Activities. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation* 1990; 71(7): 505-509.
- (13) 飛松好子, 矢野英雄, 軽部俊二, 鴨川盛秀, 内側支柱外反継手付き膝装具の歩行に及ぼす影響. 日本義肢装具学会誌 1997;13(4):347-350.
- (14) Eltoukhy M., Asfour S., Thompson C., Latta L., Evaluation of the Performance of Digital Video Analysis of Human Motion: Dartfish Tracking System. *International Journal of Scientific and Engineering Research* 2012; 3(3): 1-6.
- (15) Morrey B.F., Askew L.J., Chao E.Y., A biomechanical study of normal functional

- elbow motion. *Journal of Bone and Joint Surgery* 1981; 63(6): 872-877.
- (16) Lowe B.D., Accuracy and validity of observational estimates of wrist and forearm posture. *Ergonomics* 2004; 47(5): 527-554.
- (17) Rempel D. M., Keir P. J., Bach J. M., Effect of wrist posture on carpal tunnel pressure while typing. *Journal of orthopaedic research* 2008; 26(9): 1269-1273.
- (18) 山口崇, 加嶋良年, 笹田一郎, 4 個の正方形コイルを用いた 3 次元磁気式モーションキャプチャ. *日本磁気学会* 2008; 32: 17-23.
- (19) 水戸部一孝, 二階堂勲, 鈴木雅史, 吉村昇, 圧力同時計測型手指用モーションキャプチャ装置の開発と手指巧緻動作の計測. *情報処理学会* 2009; DD-72(12): 1-6
- (20) 工藤香児, 水戸部一孝, 本田耕平, 石川和夫, 磁気式モーションキャプチャーシステムを用いた姿勢制御評価の試み. *日本耳鼻咽喉科学会会報* 2013; 116(10): 1106-1113.
- (21) King K., Toon S.W., Perkins N.C., Najafi K., Wireless MEMS inertial sensor system for golf swing dynamics. *Sensors and Actuators A* 2008; 141: 619-630.
- (22) King K., Hough J., McGinnis R., Perkins N.S., A new technology for resolving the dynamics of a swinging bat. *Sports Engineering* 2012; 15: 41-52.
- (23) 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭, 慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法に関する研究. *日本機械学会論文集 C 編* 2013; 79(803): 2351-2361.
- (24) Petuskey K., Bagley A., Abdala E., James M.A., Rab G., Upper extremity kinematics during functional activities: three-dimensional studies in a normal pediatric population. *Gait and Posture* 2007; 25(4): 573-579.
- (25) Kasten P., Rettig O., Loew M., Wolf S., Raiss P., Three-dimensional motion analysis of compensatory movements in patients with radioulnar synostosis performing activities of daily living. *Journal of Orthopaedic Science* 2009; 14(3): 307-312.
- (26) Hussaini A., Zinck A., Kyberd P., Categorization of compensatory motions in transradial myoelectric prosthesis users. *Prosthetics and Orthotics International* 2017; 41(3): 286-293.
- (27) Abdel-Aziz Y.I. and H.M. Karara, Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates in Close-range Photogrammetry. *ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry* 1971.
- (28) Wu, G., van der Helm, F.C.T., Veeger, H.E.J., Makhsous, M., van Roy, P., Anglin, C., Nagels, J., Karduna, A.R., McQuade, K., Wang, X., Werner, F.W., Buchholz, B., ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the

- reporting of human joint motion-Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics* 2005; 38(5): 981-992.
- (29) Engin, A.E.: On the biomechanics of the shoulder complex, *Journal of Biomechanics* 1980; 13(7): 575-590.
- (30) Inman, V.T., Saunders, J.B., Abbott, L.C.: Observations on the function of the shoulder joint, *Journal of Bone and Joint Surgery* 1944; 26: 1-30.
- (31) Bagg, S.D., Forrest, W.J.: A biomechanical analysis of scapular rotation during arm abduction in the scapular plane, *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation* 1988; 67(6): 238-245.
- (32) Van der Helm, F.C., Pronk, G.M.: Three-dimensional recording and description of motions of the shoulder mechanism, *Journal of Biomechanical Engineering* 1995; 117(1): 27-40.
- (33) Codman, E.A.: *The Shoulder: Rupture of the supraspinatus tendon and other lesions in or about the subacromial bursa*, Thomas Todd Co. 1934; 32-64.
- (34) Poppen, N.K., Walker, P.S.: Normal and abnormal motion of the shoulder, *J Bone Joint Am* 1976; 58(2): 195-201.
- (35) Matsui, K., Shimada, K., Paul D. Andrew: Deviation of skin marker from bone target during movement of the scapula, *Journal of Orthopaedic Science* 2006; 11(2): 180-184.
- (36) Freedman, L., Munro, R.R.: Abduction of the arm in the scapular plane: scapular and glenohumeral movements. A roentgenographic study. *Journal of Bone and Joint Surgery - Series A* 1966; 48(8): 1503-1510.
- (37) 水野忠文, 高橋華王, 下野富紹, 日本人の皮膚の伸張量および移動量の研究. *体育學研究* 1963; 7(3): 91-98.
- (38) 原田隆司, 土田和義, 苅坂佳世子, 入矢昌子: 皮膚伸びと衣服伸び. *繊維機械学会誌* 1983; 36(6): 275-279.
- (39) Douglas A. Bourne, Anthony M. T. Choo, William D. Regan, Donna L. MacIntyre, Thomas R. Oxland, Calgary: Three-dimensional rotation of the scapula during functional movements: An in vivo study in healthy volunteers, *Journal and Shoulder and Elbow Surgery* 2007; 16(2): 150-162.
- (40) William E. Janes, J. M. Brown, J. M. Essenberg, J. R. Engsberg: Development of a method for analyzing three-dimensional scapula kinematics, *HAND* 2012; 7(4): 400-406.
- (41) 中村康雄, 林豊彦, 中村真理, 建道寿教, 信原克哉, 菊入大輔, 桐生慎哉: 体表マーカの偏位と肩甲骨運動の in-vivo 計測. *バイオメカニズム* 2004 17, 111-121.
- (42) 井上清和, 中野恵司, 林裕人, 芝野広志, 大場章司, 入門パラメータ設計.

東京：日科技連出版社，2013.

- (43) 中島咲哉， 上肢切断者に対するリハビリテーションの実態と問題点． リハビリテーション医学 1997; 34(1): 60-69.
- (44) 中島咲哉， 義手の現状と将来—義手に関する七不思議—. 日本義肢装具学会 1989; 5(特別号): 1-4.
- (45) 川村次郎， 福井信佳， 中川正巳， 藤下武， 青山孝， 古川宏， 上肢切断者の現状と動向—近畿地区におけるアンケート調査から—. リハビリテーション医学 1999; 36(6): 384-389.
- (46) Kejlaa G.H., Consumer concerns and the functional value of prostheses to upper limb amputees. *Prosthetics and Orthotics International* 1993; 17(3): 157-163.
- (47) Kyberd P.J., Wartenberg C., Sandsjö L., Jönsson S., Gow D., Frid J., Almström C., Sperling L., Survey of Upper-Extremity Prosthesis Users in Sweden and the United Kingdom. *Journal of Prosthetics and Orthotics* 2007; 19(2): 55-62.
- (48) Kyberd P.J., Hill W., Survey of upper limb prosthesis users in Sweden, the United Kingdom and Canada. *Prosthetics and Orthotics International* 2011; 35(2): 234-241.
- (49) 川村次郎， 中川昭夫， 澤村誠志， 森本正治， 諸外国における筋電義手の公的支援制度—e-mailによるアンケート調査の結果—. 日本職業・災害医学会 2001; 49(5): 501-508.
- (50) 陳隆明， 筋電義手普及の現状と課題， 高位切断者に対する戦略， そして今後の展望． リハビリテーション医学 2012; 49(1): 31-36.
- (51) 陳隆明， 柴田八衣子， 溝部二十四， 大庭潤平， 上肢切断に対するリハビリテーションチームアプローチとリハビリテーション目標． 日本義肢装具学会誌 2013; 29(4): 203-205.

謝辞

本研究は、東京電機大学大学院先端科学技術研究科 先端技術創成専攻 博士課程後期において行った研究をまとめたものです。

大西謙吾教授には、博士課程後期入学当初から長きに渡りご指導賜りました。研究の進め方、考え方など研究の基礎から親切丁寧にご指導を頂き、また研究者としての姿勢に関しても多くご指導頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

本論文執筆にあたり、副査の羽根吉寿正教授、内川義則教授、矢口俊之准教授にはご指導、ご助言を頂きました。心より御礼申し上げます。

最後に、論文執筆にあたり、多くの方々からご指導、ご協力を頂きました。この場を借りて改めて御礼申し上げます。

付録

表 A マーカ位置の詳細

	Code Marker	Marker description	Marker position description
Trunk	C7	7th Cervical vertebrae	Spinous process of the 7th cervical vertebrae
	T8	8th Thoracic vertebrae	Spinous process of the 8th thoracic vertebrae
	IJ	Incisura jugularis	Deepest point of Incisura Jugularis
	PX	Processus xiphoideus	Xiphoid process, most caudal point on the sternum
Scapula	TS	Trigonum spinae scapulae	The midpoint of the triangular surface on the medial border of the scapula in line with the scapular spine
	AI	Angulus inferior	Most caudal point of the scapula
	AA	Angulus acromialis	Most laterodorsal point of the scapula
Upper arm	AC	Acromion	Most dorsal point on the acromioclavicular joint
	EM	Elbow medial	Medial epicondyle, approximating elbow joint axis
	EL	Elbow lateral	Lateral epicondyle, approximating elbow joint axis
	UA	Upper arm	1/2 of the line between AC and EL
	UAA	Upper arm anterior	1/2 of the line between UA and EL, the anterior upper arm
	UAP	Upper arm posterior	1/2 of the line between AC and UA, the posterior upper arm
Forearm	RS	Radial styloid	Most caudal–lateral point on the radial styloid
	US	Ulnar styloid	Most caudal–medial point on the ulnar styloid process
Hand	FI	Dorsum of hand	Dorsum of the right third metacarpal

表 B-1 腕下垂

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Upper limbs droop along the trunk	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	11
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	11
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	8
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5
1	Middle	Upper limbs droop along the trunk	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	11
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	11
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	8
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5
1	Low	Upper limbs droop along the trunk	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	11
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	11
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	○	×	7
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			×	×	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5

表 B-2 肩關節屈曲 90deg, 前腕中間位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Shoulder flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12
3			○	○	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	○	○	×	10
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	7
9			○	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	8
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	5
11			○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	○	×	×	7
1	Middle	Shoulder flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	6	
2			×	○	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	8	
3			×	○	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	8
4			×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×	×	8
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	7
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	5
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	×	6
1	Low	Shoulder flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	4	
2			○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	8
3			×	○	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○	8
4			×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	×	6
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	5
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	×	6

表 B-3 肩關節屈曲 90deg, 前腕回内位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Shoulder flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	○	○	8	
2			×	○	×	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	9	
3			×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
4			×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	12
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	○	9
9			×	×	○	○	○	×	○	×	×	×	○	○	×	○	○	○	○	9
10			○	×	○	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	8
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	8
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○	9
1	Middle	Shoulder flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	5	
2			○	○	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	9	
3			×	○	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	9	
4			×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	12	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	7
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	8	
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	6
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	8
1	Low	Shoulder flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×	5	
2			○	○	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	9	
3			×	○	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	9	
4			×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	13	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	×	11	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	6	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	5	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	8	
10			○	×	○	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	○	7	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	○	7	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	○	7	

表 B-4 肩關節屈曲 90deg, 前腕回外位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker		
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI			
1	High	Shoulder flexion 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	○	×	×	7	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	9	
3			○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13	
4			×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	14	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	12	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	○	×	×	9	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	○	○	×	9	
9			×	×	○	○	○	×	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	9	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
1	Middle	Shoulder flexion 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	○	×	5		
2			×	○	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	10		
3			×	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13	
4			×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	15	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5	
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	9	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
1	Low	Shoulder flexion 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	8		
2			○	○	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	11		
3			×	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	12	
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	12	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6	
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4	
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	8	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	7	
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	○	○	7	
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	○	○	6	

表 B-5 肩關節外轉 90deg, 前腕中間位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Shoulder abduction 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	5	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
3			○	○	×	×	×	○	×	○	×	×	○	○	○	○	○	×	×	8
4			○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	6
1	Middle	Shoulder abduction 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
3			○	○	×	×	×	○	×	○	×	×	○	○	○	×	○	×	×	7
4			○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	11
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	5
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	6
1	Low	Shoulder abduction 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	7	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	7	
3			○	○	×	×	×	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	7	
4			○	○	×	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○	11
5			×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○	11
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	×	○	○	9
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	7

表 B-6 肩關節外轉 90deg, 前腕回内位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Shoulder abduction 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	○	○	8	
3			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	○	○	○	9	
4			○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	○	11
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	○	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	6
1	Middle	Shoulder abduction 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	○	7	
2			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
3			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	5
4			○	○	×	×	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	8
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	×	○	○	10
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	5
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	○	7
1	Low	Shoulder abduction 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	○	7	
2			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	6	
3			○	○	×	×	×	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
4			○	○	×	×	○	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	6	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	11
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	×	10
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	○	○	×	○	×	9
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	○	7

表 B-7 肩關節外轉 90deg, 前腕回外位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																	Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Shoulder abduction 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
3			○	○	×	×	×	○	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	9	
4			○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	×	×	×	10
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	13
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	○	×	○	10
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	4
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	7
1	Middle	Shoulder abduction 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	8
3			○	○	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	7
4			○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	○	○	○	11
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	4
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	○	○	×	7
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	7
1	Low	Shoulder abduction 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	○	○	7	
2			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	○	6	
3			○	○	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	6	
4			○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	○	×	○	10
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	2
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	○	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	○	○	7

表 B-8 肩關節外轉 180deg

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																	Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI			
1	High	Shoulder abduction 180 deg	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	6		
2			○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	7	
3			○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	8	
4			○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	○	○	11
9			○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	9
10			○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	5
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	×	○	4
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	○	7
1	Middle	Shoulder abduction 180 deg	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	6		
2			○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	7	
3			○	○	×	×	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	9	
4			○	○	×	×	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○	11
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	○	○	11
9			○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	9
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	○	7
1	Low	Shoulder abduction 180 deg	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	9	
2			○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	7	
3			○	○	×	×	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	9	
4			×	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	11
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	○	×	10
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	○	×	×	○	7
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	3
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	○	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	6

表 B-9 肩關節下垂, 肘關節屈曲 90deg, 前腕中間位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	×	○	×	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	×	6
1	Middle	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	○	7	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	11	
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	5
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	5
1	Low	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	×	○	○	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
4			○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	5
10			○	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×	×	5
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	5

表 B-10 肩關節下垂, 肘關節屈曲 90deg, 前腕回內位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	×	10
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	×	×	8
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	5
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	4
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	○	×	○	8
1	Middle	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	10
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	○	11
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	×	10
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	4
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	○	×	○	8
1	Low	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	5
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	×	×	×	6

表 B-11 肩關節下垂, 肘關節屈曲 90deg, 前腕回外位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker		
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI			
1	High	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6		
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	9	
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	×	○	11
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4	
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	4	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	○	×	6		
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	○	×	×	7	
1	Middle	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6		
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	14	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	○	11	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4	
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	5	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	○	×	6		
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	×	×	○	×	6	
1	Low	Shoulder neutral position, elbow flexion 90 deg, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	×	○	×	6		
2			○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	10		
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11		
4			○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	14	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	○	11	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4	
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	5		
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	○	○	6		
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	○	○	7		

表 C-1 手部位置近位, 前腕中間位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position proximal side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	4
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	6
1	Middle	Hand position proximal side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	11	
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	8
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	3
11			○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	6
1	Low	Hand position proximal side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	○	6	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	○	7	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	7	
4			×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	4

表 C-2 手部位置近位, 前腕回内位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position proximal side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	11	
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	6
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	5
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9
1	Middle	Hand position proximal side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	8
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	5
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	4
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	7
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9
1	Low	Hand position proximal side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	○	○	7	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	○	○	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	7	
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	5
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	4
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	○	5
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	○	○	6

表 C-3 手部位置近位, 前腕回外位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker		
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI			
1	High	Hand position proximal side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	×	×	7		
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	10	
3			○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	11
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	8
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	7
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	5
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	5
1	Middle	Hand position proximal side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	6		
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	10
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	11
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	8
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	5
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	5
1	Low	Hand position proximal side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5		
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	8		
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	9	
4			×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	11
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	5

表 C-4 手部位置反対側，前腕中間位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker			
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI				
1	High	Hand position opposite side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11			
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	11		
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13	
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	○	11	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	8
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	7	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	×	7	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	×	6	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	5	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	9	
1	Middle	Hand position opposite side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	10		
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	10	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	13
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	9	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	7	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	6	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	5	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	×	×	6	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5	
12	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	○	×	○	○	○	8			
1	Low	Hand position opposite side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	○	7			
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	9		
3			○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	9		
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10		
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10		
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	×	×	×	8		
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	6		
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	5		
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	5		
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	6		
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	4		
12			○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	○	6		

表 C-5 手部位置反对側，前腕回内位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position opposite side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	8
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	7
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	×	○	○	7
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	○	○	7
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9
1	Middle	Hand position opposite side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	○	×	○	○	9	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	9	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	12
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	8
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	7
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9
1	Low	Hand position opposite side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	9	
3			○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	○	9	
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	×	×	×	×	8
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
11			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8

表 C-6 手部位置反对側，前腕回外位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position opposite side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	10	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	10	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	×	11
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	8
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	8	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	7	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	×	×	7	
1	Middle	Hand position opposite side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	10	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	10	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	9
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	6
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	7	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×	×	5	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	6	
1	Low	Hand position opposite side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	×	×	8	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	8	
3			○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	8	
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	×	9
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	×	×	×	8
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	5
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	×	×	×	5	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	×	×	6	

表 C-7 手部位置同側，前腕中間位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position same side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11	
3			○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13	
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	13	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	7	
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	6	
10			○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	6	
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	5	
1	Middle	Hand position same side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	○	7	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	11	
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	12	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	11	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	6	
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	5	
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	4	
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	×	6	
1	Low	Hand position same side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	×	×	×	○	5	
2			○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	×	○	7	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	10	
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	○	11
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	×	×	10
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	5
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5

表 C-8 手部位置同側，前腕回内位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position same side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12	
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	6
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	○	6
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	○	○	7
1	Middle	Hand position same side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	×	○	○	×	○	×	○	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	10	
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	11
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	○	5
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	8
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	6
1	Low	Hand position same side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	○	○	7	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	×	○	○	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	×	9
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○	4
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	○	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	6

表 C-9 手部位置同側，前腕回外位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI	
1	High	Hand position same side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	×	6
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	9
3			○	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	11
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	7
9			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	7
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	6
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	7
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	○	○	8
1	Middle	Hand position same side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	5	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	×	9	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	11
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	12
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	9
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	6
10			○	×	○	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	6
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	○	6
1	Low	Hand position same side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	5	
2			○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	○	×	7	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	○	×	8	
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	×	×	8
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	3
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	4

表 C-10 手部位置遠位, 前腕中間位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker		
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI			
1	High	Hand position distal side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	10	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	11
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	14
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	7
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	6
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○	×	○	×	×	×	6
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	×	×	○	×	×	×	6
1	Middle	Hand position distal side, forearm neutral position	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	○	8	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	10	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13	
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6	
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	6	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	○	×	×	×	×	5	
1	Low	Hand position distal side, forearm neutral position	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	7		
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	9		
3			○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	○	9		
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	11	
5			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	○	10	
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	○	10	
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	6	
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4	
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	6	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	×	6	
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	×	×	5	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	○	×	×	×	×	5	

表 C-11 手部位置遠位, 前腕回內位

Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position distal side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	○	○	○	○	10	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	7
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	○	8
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	○	○	8
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	○	○	○	○	8
1	Middle	Hand position distal side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	9	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	○	7
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	6
1	Low	Hand position distal side, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	10	
3			○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	11
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	×	10
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	×	9
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	○	7
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	6

表 C-12 手部位置遠位, 前腕回外位

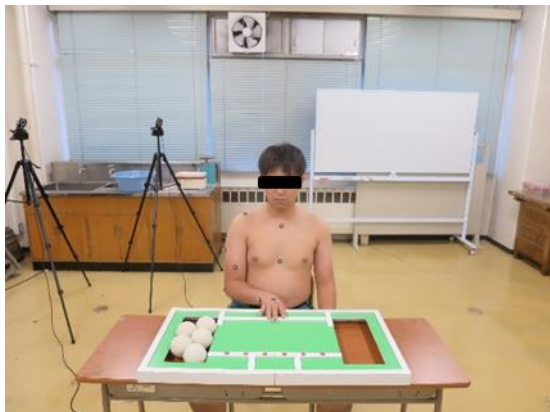
Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position distal side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	9	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	12
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	5
9			×	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	8	
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	7
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	○	○	×	7	
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	○	×	7	
1	Middle	Hand position distal side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×	6	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	10	
3			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	13
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	×	○	11
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	6
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	×	7
11			○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	×	7
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	×	○	×	7
1	Low	Hand position distal side, forearm supination	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	5	
2			○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	9	
3			×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	8	
4			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	11
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	○	○	×	×	9
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	6
8			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	4
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	5
10			○	○	○	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×	×	×	6
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	×	×	×	×	×	5
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	×	×	×	○	7

表 C-14 手部位置中央, 前腕回内位

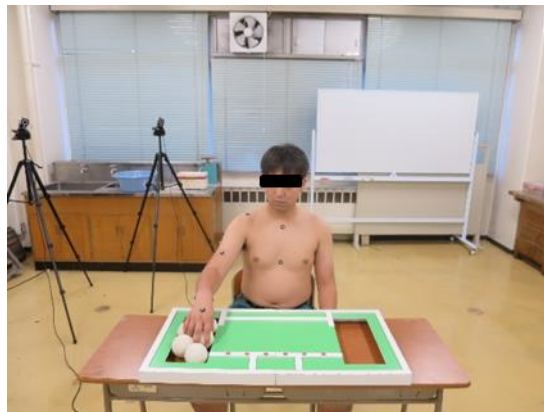
Camera No.	Camera height	Posture	Marker placement																Number of marker	
			IJ	PX	C7	T8	TS	AI	AA	AC	UAP	UA	UAA	EM	EL	RS	US	FI		
1	High	Hand position center, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
4			○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	13
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	7
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	7
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	○	○	7
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	○	○	○	9
1	Middle	Hand position center, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	12
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	12
6			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	8
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
10			○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	6
11			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	×	○	8
12			○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	○	○	7
1	Low	Hand position center, forearm pronation	○	○	×	×	×	×	×	○	×	○	○	×	○	×	○	○	8	
2			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	○	○	10	
3			○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	×	○	×	×	○	9	
4			×	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	11
5			×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	×	11
6			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○	○	×	×	10
7			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	7
8			×	×	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×	×	×	×	6
9			×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	6
10			○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	○	6
11			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	6
12			○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	○	×	×	○	×	○	○	6

静的計測での STEF の 10 検査の各姿勢

検査 1 (大球)



(a) スタートポジション



(b) 把持



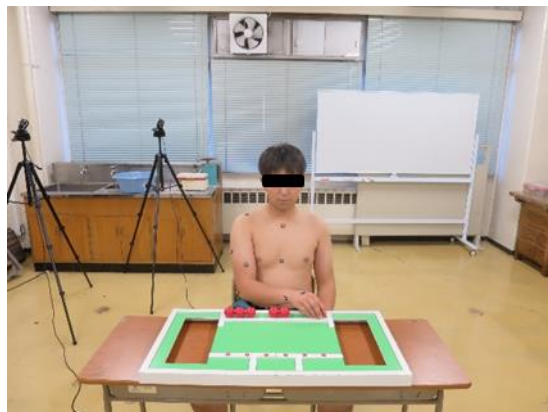
(c) 移動

図 A-1 検査 1 (大球)での測定動作

検査 2 (中球)



(a) スタートポジション



(b) 反対側近位把持



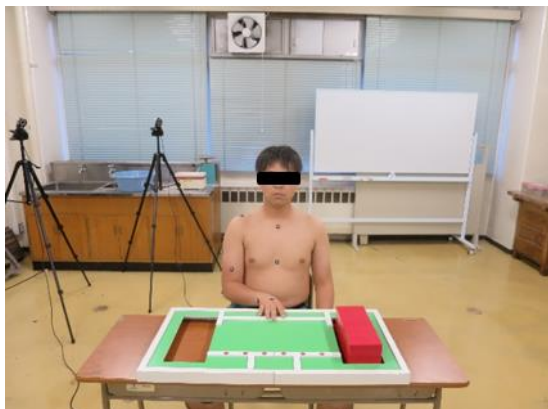
(c) 同側近位把持



(d) 移動

図 A-2 検査 2 (中球)での測定動作

検査 3 (大直方体)



(a) スタートポジション



(b) 反対側遠位把持



(c) 反対側近位把持



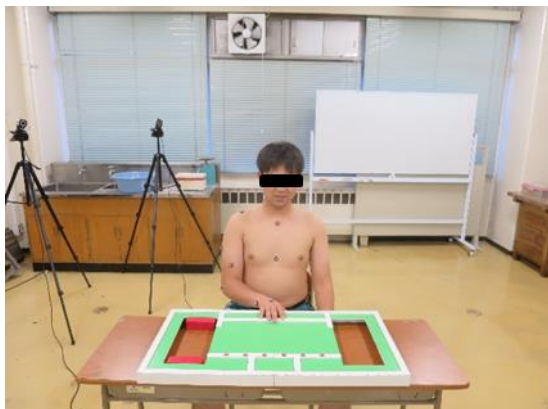
(d) 同側遠位移動



(e) 同側近位移動

図 A-3 検査 3 (大直方体)での測定動作

検査 4 (中立方体)



(a) スタートポジション



(b) 同側遠位把持



(c) 同側近位把持



(d) 反対側近位移動



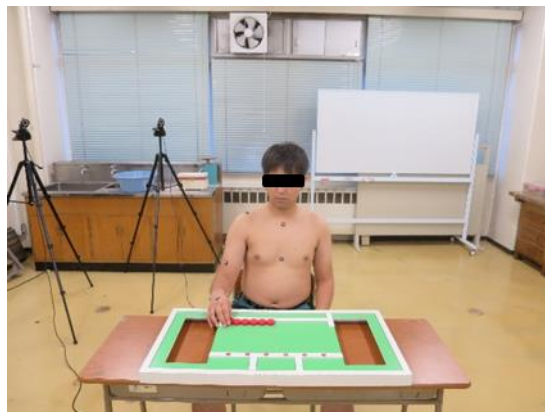
(e) 近位移動

図 A-4 検査 4 (中立方体)での測定動作

検査 5 (木円板)



(a) スタートポジション



(b) 同側近位把持



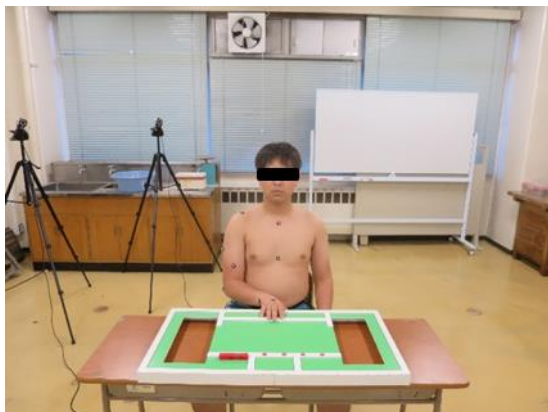
(c) 反対側近位移動



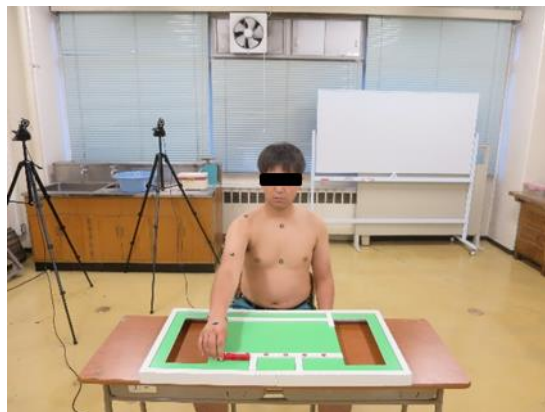
(d) 近位移動

図 A-5 検査 5 (木円板)での測定動作

検査 6 (小立方体)



(a) スタートポジション



(b) 同側遠位把持



(c) 遠位把持



(d) 反対側近位移動



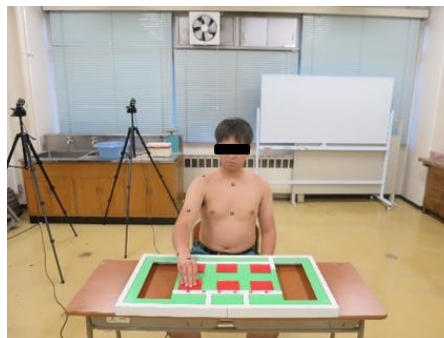
(e) 近位移動

図 A-6 検査 6 (小立方体)での測定動作

検査 7 (布)



(a) スタートポジション



(b) 同側遠位把持 (回内位)



(c) 同側遠位把持 (中間位)



(d) 同側遠位把持 (回外位)



(e) 反対側近位把持 (回内位)



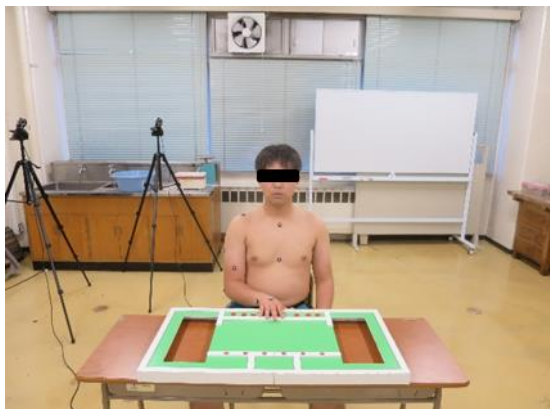
(f) 反対側近位把持 (中間位)



(g) 反対側近位把持 (回外位)

図 A-7 検査 7 (小立方体)での測定動作

検査 8 (金円板)



(a) スタートポジション



(b) 同側近位把持



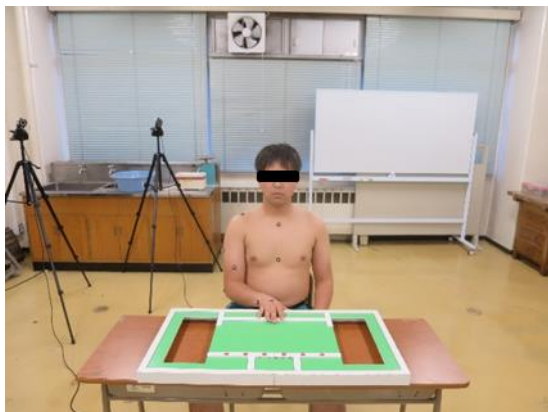
(c) 反対側近位把持



(d) 遠位移動

図 A-8 検査 8 (金円板)での測定動作

検査 9 (小球)



(a) スタートポジション



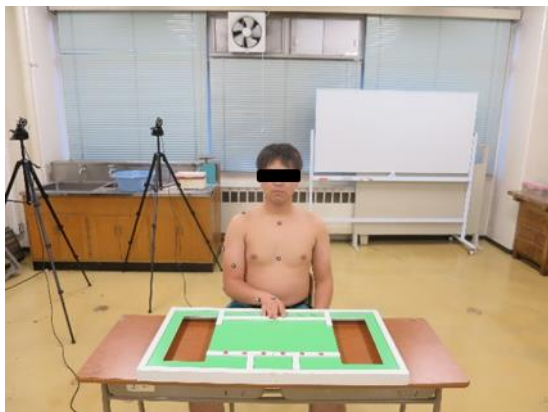
(b) 把持



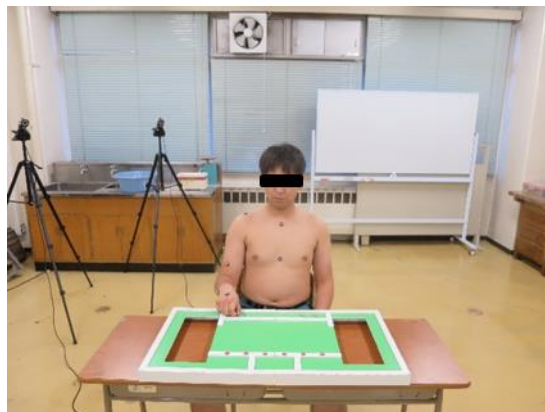
(c) 移動

図 A-9 検査 9 (小球)での測定動作

検査 10 (ピン)



(a) スタートポジション



(b) 同側近位把持



(c) 反対側近位把持



(d) 同側遠位移動



(e) 反対側遠位移動

図 A-10 検査 10 (ピン)での測定動作