2015 年度修士論文

OWAS 法に準拠した
作業姿勢評価装置の開発に関する研究

首都大学東京大学院
システムデザイン研究科
システムデザイン専攻
経営システムデザイン学域
博士前期課程
学修番号：14892505
奥田　誠司

指導教員　梶原　康博　教授

目次

1. 緒言 1

2. 本装置の概要及び機能 3
2.1 Kinect for Windows の概要 3
2.2 Kinect による座標データの記録 5
2.3 作業領域内での作業姿勢確認 6
2.4 OWAS 法による作業姿勢評価 7

3. 姿勢評価までの手順及び方法 8
3.1 Kinect2 台による撮影 8
3.2 関節回転角度算出 8
3.3 作業姿勢再現 13
3.4 姿勢コード判定条件 17
3.5 姿勢コードの判別式 19

4. Kinect を用いた対象作業の撮影 34
4.1 先行研究における課題 34
4.2 Kinect for Windows の作業姿勢キャプチャ適用 36
4.3 2 台の Kinect による撮影 36
4.3.1 Kinect カメラの配置 36
4.3.2 キャリブレーション 37
4.4 模擬作業への適用 38
4.5 作業姿勢評価値の比較 42

5．座標補正手法 45
5.1 誤判定要因の検討 45
5.2 重回帰分析の適用 46
5.3 補正式による位置推定結果 48
5.4 要作業姿勢判定時間の比較 50

6. 結言 51
参考文献 52

1. 緒言

生産活動において Q(品質), C(コスト), D(納期)を高い水準に保つためには，作業員の健康に対する配慮は不可欠である．作業員の作業負担を評価する手法として OWAS(Ovako Working Posture Analysing System)法が広く使用されている[1]. 著者　は，先行研究として OWAS 法の姿勢判定基準を定式化した．VR(人工現実感技術)により仮想作業域で作業を再現することにより作業姿勢を PC 上で評価できるようにした[2]. しかし，先行研究[2]では，実作業の動画から VR 上での動作を作成するために多くの時間を要するという課題があった．主な研究として，人工現実感(VR)を用いて製品設計と工程設計を並行して行うことが試みられている．E.J.Carey 等によりコンピュータ上で作業者および設備の動作を 3D 動画により計画できる技術が開発されている[3]. また，3D 動画による動作計画に加えて工程設計者が仮想空間内で組立作業を計画できる装置の開発も行われている[4]. このような従来の研究では，主に製品設計から工程設計までの期間を短縮することを目的として VR が活用されている．また，工程設計後から量産開始までの期間を短縮することを目的として，VR を用いて作業訓練を行うことが研究されている[5].

本研究では，製造企業における生産システム設計の迅速化を図るために，人工現実感(VR)を用いた作業設計支援システムの開発を目的としている．先行研究では，上記の研究を踏まえた上で，動作計画支援装置を開発した[6]. 撮影した動画から PC 画面上に仮想作業域を表示し，作業中の作業者の動作を設計する．さらに，記録したデータから OWAS(Ovako Working Posture Analysing System)法を用いることにより作業者の作業姿勢(作業姿勢)を評価することを可能にしている．姿勢評価値の判定手法として OWAS(Ovako working posture analyzing system)[7], RULA(rapid upper limb asessment)[8], 作業姿勢 index[9]等がある．何れの手法も目視により作業姿勢が分類されるため，判定結果が分析者の熟達度に影響される．これまでに，OWAS および RULA に対応できるソフトウエア Jack が市販されている．しかし，高額なソフトウエアライセンスが課題とされている[10]そこで，作業姿勢評価装置を独自に開発する研究が行われている．藤沢等は作業姿勢 index における作業姿勢の分類基準を定式化した．そして，モーションキャプチャ装置により関節の屈曲を測定し，ファジイ推論を用いて姿勢評価値を判定できる装置が開発されている[11]. Krzystof 等は OWAS に類似した姿勢分類基準を設定した．そして，荷重を考慮して姿勢評価値を 5 段階で判定できる装置が開発されている[12]. Y.H.Rim 等は RULA における作業姿勢の分類基準を定式化した．そして，デジタルヒューマンモデルによる作業姿勢から姿勢評価値を得る装置が開発されている[13].

先行研究から継続して，産業医の知識がない人でも先行研究の装置を用いて，産業医と同じ姿勢評価が出来るようになることを大きな目的としている．また，稼働分析や生産性に影響を及ぼす要因の分析を行うことによって，作業工程を効率よく設計することが可能にな

る.

先行研究では本提案装置を用いて，実際の仮想作業現場での運用を行い，稼働分析，生産性に影響を及ぼす要因の分析や姿勢評価をして装置の有効性を検証した．より使いやすく，短時間で生産システムの作業設計を行うため，3 次元映像解析手法を用い，4 台のビデオカメラよりモーションキャプチャを行った．ここで用いる 3 次元映像解析法は，Abdel-Aziz. と Karara[14] によって発表された写真測量方法の一手法である．2 台以上のカメラを用いることで簡便に 3 次元座標を復元できる．この解析法中では，DLT 法(Direct Linear Transformation method)を用いた．この DLT 法は，複数のカメラを用いて 3 次元位置座標を推定する計測方法である[15].

具体的には，カメラ 4 台を用いて実際の現場での作業者を撮影し，マウスポイントにより座標データを取得した．しかし，カメラ動画のフレームレート 30/s 毎に身体の各関節を手動でポイントしなければならない．さらに，姿勢評価用データの作成に非常に時間がかかる．また，4 台のカメラのキャリブレーション等のための準備工数も多くかかる．

そこで本研究では，姿勢評価用データ取得工数，および要作業姿勢評価時間を削減することを目的とする．マイクロソフト社の Kinect を用いることを考えた．身体の各関節の座標を連続かつ自動で取得できるようにした．座標データから OWAS 法に基づく姿勢評価を可能にした．姿勢評価の過程で姿勢コードの推定値と評価値と，産業医による評価値の差を小さくするための補正方法を提案している．

2. 本装置の概要及び機能

本装置では，作業域の設計，作業手順の計画，作業手順書の作成，および作業姿勢の評価までを連続して行うことができるようにするために，Kinect for Windows により作業者の動作および姿勢を連続でキャプチャし，また，記録された作業姿勢から作業姿勢を評価できる．

2.1 Kinect for Windows の概要

Kinect for Windows は RGB カメラ・深度センサー・マイク等から構成される，モーションキャプチャという技術を使用したデバイスである．しかし，通常のモーションキャプチャ時に着用する特殊なマウス付きスーツと，マウス検出時に使用するトラッカーは必要としない．カメラに被写体を映すことで Kinect までの距離を計測し，骨格などの動きを検出する．これまでの深度センサーは高価であったが，Kinect では 1/10 の価格で同種のセンサーが使用できるため，安価で手に入れることができるといったメリットがある．下の図 1 に装置の画像、表 1 に仕様を示す．



図 1　Kinect for Windows

表 1．Kinect for Windows 仕様

項目	仕様
カラー画像解像度	RGB_640x480(30fps)
深度画像解像度	640x480(30fps)
深度計測方法	Light Coding
深度測定範囲	800～4000mm(設定値：Default)
カラーの視野	水平62度，垂直48.6度
深度の視野	水平57度，垂直43度

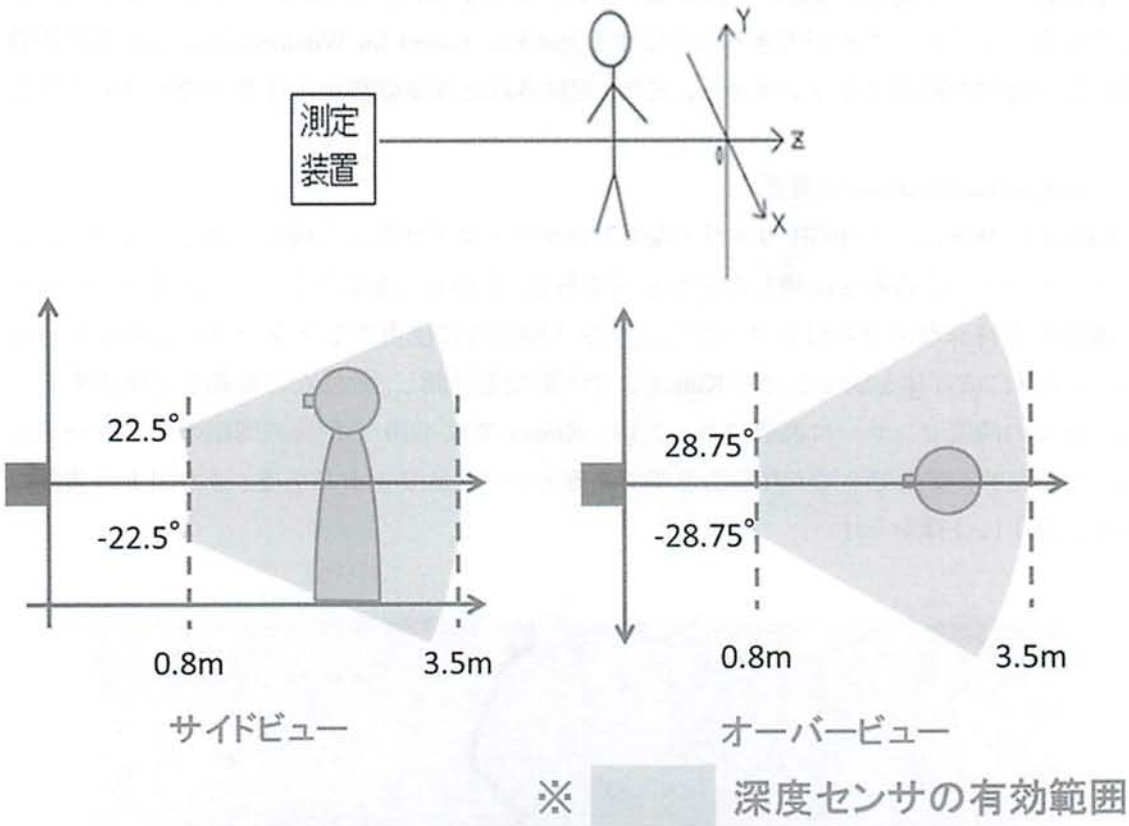


図 2. Kinect 座標系と有効範囲

上の図 2 に，Kinect による座標取得時の座標系，および有効範囲を示す．

Kinect の IR カメラ(赤外線カメラ)が映しだす各画素に対応する情報は short 型で与えられる．

1 画素分の情報，つまり short あたりに含まれる値には，2 種類の値がある．1 つが「深度値」2 つ目が「ユーザ識別値」である．深度値はその画素に投影される空間までの距離を示す値であり，一方でユーザ識別値はその画素に何番目に認識されている人物が表示されているか(いないか)を示す値となっている．

例えば Kinect の有効範囲内に 2 人の作業者が映っているとする．ある画素に 1 人目の作業者が映っていれば，その画素(short)が示すユーザ識別値は 1 となる．またそれとは異なる画素に 2 人目の作業者が映っていれば，その画素が示すユーザ識別値は 2 となる．2 人の何れもが映っていない画素にはユーザ識別値が与えらないので 0 となる．

2.2 Kinect による座標データの記録

Kinect は RGB カメラと深度センサーにより座標の取得ができる．三次元空間の直交座標系を測定装置(Kinect)から見て右手方向を X 軸，鉛直上方を Y 軸，奥行き方向を Z 軸とし座標を出力する．また，人体を 20 個の点で認識し，各部位の X,Y,Z 座標をそれぞれ出力する．人体の 20 個の点は以下の図 3 に示す．

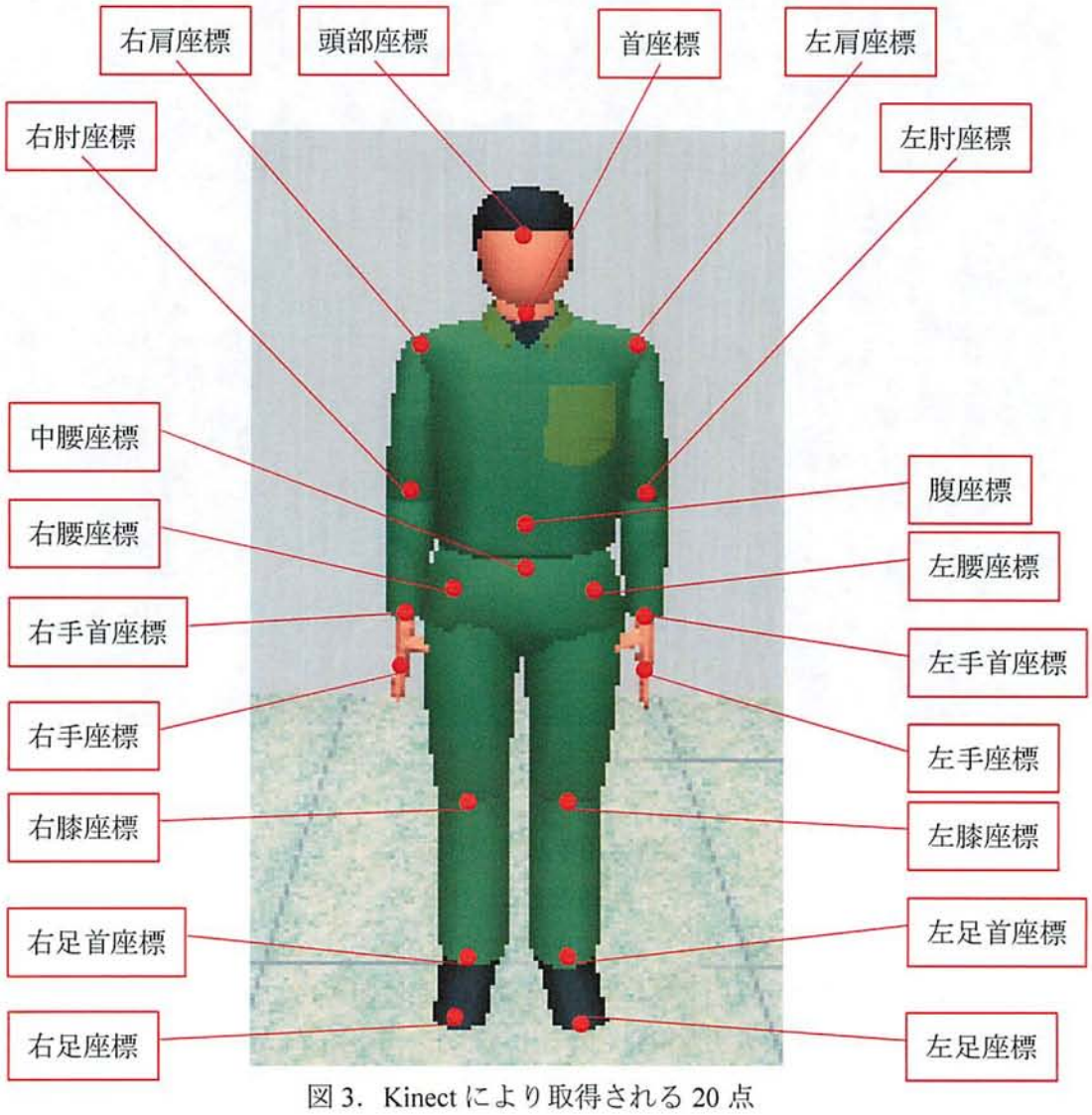


図 3．Kinect により取得される 20 点

2.3　作業領域内での作業姿勢確認

Kinect で取得した座標データを用いて，図 4 のような仮想作業域(4 視点時間同期)で作業の内容を再生，確認する．このとき同時に作業者の静的座標および関節角度データを出力する．



図 4　作業姿勢作成メイン画面

従来研究では，VR を用いた作業訓練用手順書を作成した．これは，作業再生システムで再生するファイルである．一般的に，手順書とは，作業の一つ一つについて実施の方法を説明したものである．作業の説明用または訓練用に使用される．

一般の作業手順書では写真と文書により，作業内容が説明されている．最近では，動画を用いて作業内容を説明する方法も用いられるようになっている．しかし，写真あるいは動画は映像に写っている方角のみしか，作業内容を見ることはできない．作業訓練中に，作業者は作業手順書に写っている映像と異なる方向から作業方法，作業手順を確認したい場合がある．このような要求には従来の作業手順書では対応できない．様々な視点，方向から作業内容，作業手順を認識できるようにするには，人工現実感を用いて，作業手順を再現できるようにする方法が求められる．そこで従来研究では，実際の作業を仮想領域で再現し，あらゆる角度から作業内容および作業手順を確認することを可能にしている．

2.4 OWAS 法による作業姿勢評価

作業姿勢の座標データを基に，作業姿勢を OWAS 法により評価する．OWAS 法では，ある時点での作業姿勢を背部・上肢・下肢・重さの 4 項目でとらえ，これをコード化した数字（姿勢コード）で記録する．また，OWAS 法では，姿勢コードを用いて，作業姿勢の姿勢度と改善要求度を AC（アクションカテゴリ）という評価値を使用して 4 段階で判定する．姿勢コードを以下の表 2 に，AC コードを表 3 に示す．

表 2．姿勢コード

①背部	(Ⅰ) まっすぐ
	(Ⅱ) 前または後ろに曲げる
	(Ⅲ) ひねるまたは横に曲げる
	(Ⅳ) ひねりかつ横に曲げる，または斜め前に曲げる
②上肢	(Ⅰ) 両腕とも肩より下
	(Ⅱ) 片腕が肩の高さあるいはそれより上
	(Ⅲ) 両腕が肩の高さあるいはそれより上
③下肢	(Ⅰ) すわる
	(Ⅱ) 両足をまっすぐにして立つ
	(Ⅲ) 重心をかけている片脚をまっすぐにして立つ
	(Ⅳ) 両膝を曲げて立つか中腰
	(Ⅴ) 重心をかけている片脚を曲げて立つか中腰
	(Ⅵ) 片方または両方の膝を床につける
	(Ⅶ) 歩くまたは移動する
④重さまたは力	(Ⅰ) 10kg以下(w≦10kg)
	(Ⅱ) 10～20kg(10＜w≦20kg)
	(Ⅲ) 20kgより大(w＞20kg)

表 3．AC コード

AC1	この姿勢による筋骨格系負担は問題ない．改善は不要である．
AC2	この姿勢は筋骨格系に有害である．近いうちに改善すべきである．
AC3	この姿勢は筋骨格系に有害である．出来るだけ早期に改善すべきである．
AC4	この姿勢は筋骨格系に非常に有害である．ただちに改善すべきである．

3. 姿勢評価までの手順及び方法

Kinect による作業者の撮影から姿勢評価までの流れは以下の図 5 の通りである．まず，Kinect により身体の各関節の 3 次元座標を得る．その 3 次元座標データを元に身体の各関節の曲げ角度データを取得する．曲げ角度データを用いることで VR 上にて作業姿勢の再現，確認をすることができる．また，その角度データを元に姿勢評価を行う．

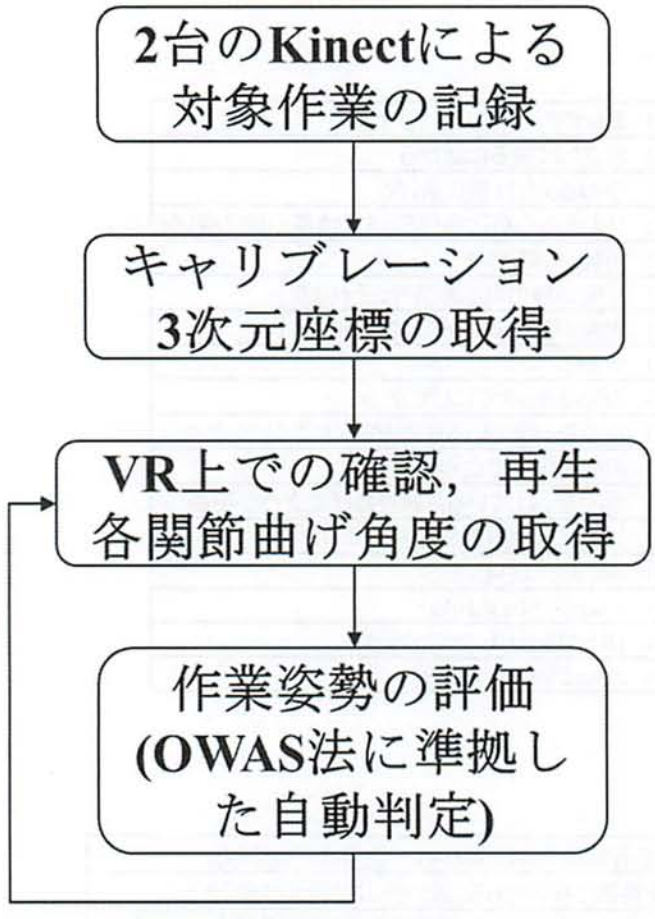


図 6. 姿勢評価までの流れ

3.1 2 台の Kinect による撮影

2 台の Kinect で撮影することによって，それぞれの Kinect から見た 3 次元座標が取得できる．フレームレートはおよそ 10/s である．この Kinect から得た 3 次元座標から身体の各部位の関節曲げ角度を算出する．

3.2 関節回転角度算出

上記にて算出する 3 次元座標は，撮影を行った際の測定装置(Kinect)(0，0，0)を原点とした座標となっている．このような各 Kinect 視点の座標系のことを Kinect 座標系という．これに対し，個々の物体の変形を扱うために用いられる座標系は，ローカル座標系と呼ばれている．本実験では，人体モデルの動きを再現するために，3.1 節で取得した Kinect 座標をロ

ーカル座標に変換する．そして，変換したローカル座標から回転角度を算出する．Kinect 座標をローカル座標に変換するために，Kinect 座標から人体モデルに各関節の回転角度を与え，人体モデルの姿勢を求める．そして，求めた姿勢からローカル座標系における回転角度を求めている．これらの求め方を以下で説明する．

図 7 に人体モデルを，図 8 に人体モデルにおける回転行列を示す．

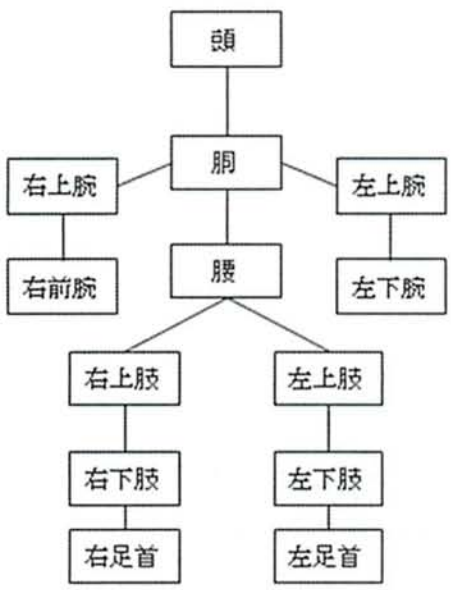


図 7．人体モデルの階層構造

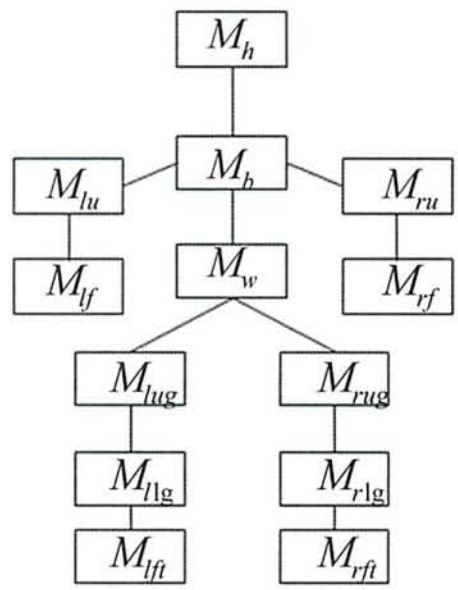


図 8．人体モデルにおける回転行列

本人体モデルでは，腰を基点にする．腰を基準とし，基点から離れる程，関節は下位の層にあるとする．人体モデルでは，任意の関節の回転が，下位の階層にあたる全てのリンクの姿勢を変化させるように構造化している．例えば，右腕は腰，胴体，右上腕，右前腕とつながる構造となっている．この構造の下では，上腕が回転しても，その影響が上位階層にある胴体の姿勢に及ぶことはない．しかし，下位階層にある前腕は，上腕との角度を保ったまま回転する．

このように図に示す階層構造は，リンクの親子関係を表す．そして，任意の親リンクが回転すると，そのルート上にある全ての子リンクは上位リンクとの角度を保ったまま回転する．

座標系は，Kinect 座標系と人体モデルの各リンクのローカル座標系を図のように設定する．初期姿勢のとき，各リンクのローカル座標系は Kinect 座標系と一致するように設定している．z 軸は垂直上向きを正，x 軸は右方向を正，y 軸は正面方向を正に取る．リンクが x，y，z 軸のいずれかを中心として回転するとき，右ネジの法則に従い，回転方向に正，

負を付ける．k 番目のリンクをローカル座標の x 軸回りに θ_{kx}，y 軸回りに θ_{ky}，z 軸回りに θ_{kz} 回転させるとき，回転行列を M_k と表す．図 9 に，Kinect 座標系(左)とローカル座標系(右)を示す

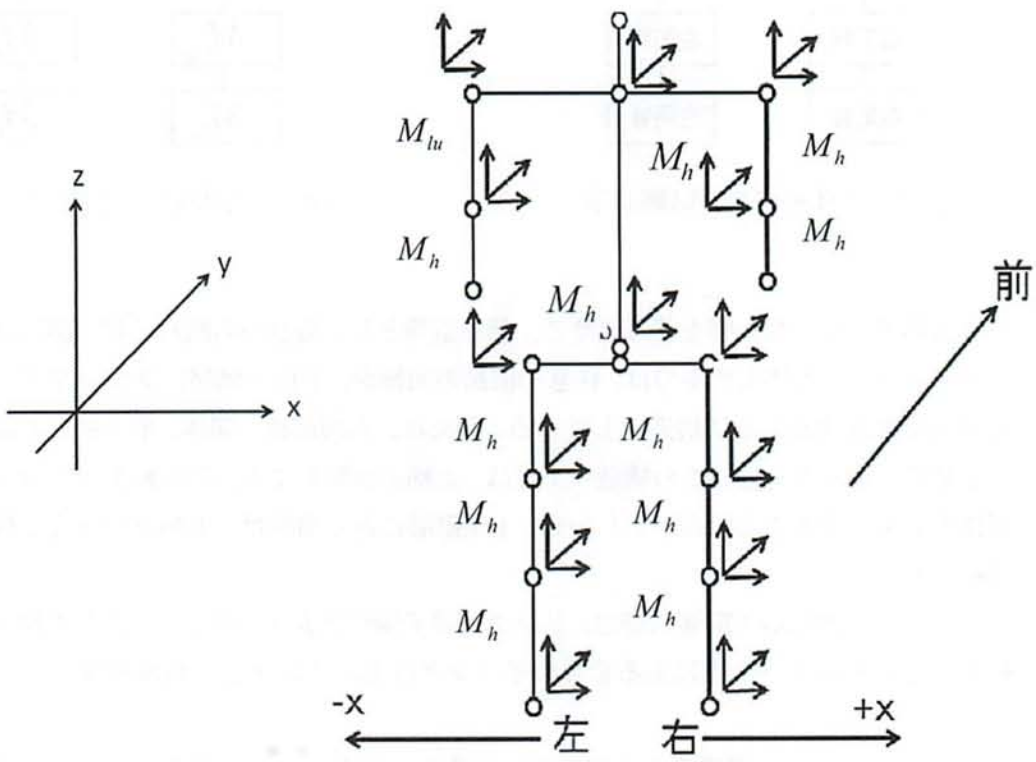


図 9　Kinect 座標系(左)とローカル座標系(右)

図で示された初期姿勢のあるリンク L を p から p'まで回転させるとする．そのとき初期姿勢ベクトル op と作業姿勢ベクトル op'の両ベクトルに垂直なベクトルを n とする．ベクトル n はベクトル op とベクトル op'の外積により求める．θ はベクトル op とベクトル op'の内積により求める．θ の求め方を式(1)に，ベクトル n の求める式を式(2)に示す．n を任意軸とし，n の周りに θ 回転させるための回転行列は式(3)のように示される．図 10 に，任意軸周りの回転を示す．

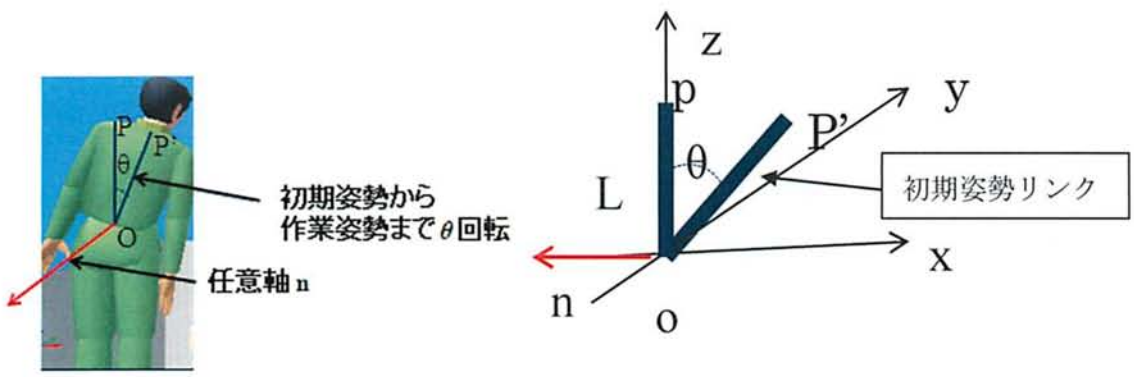


図 10．任意軸周りの回転

$$op = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \end{pmatrix}$$

$$op' = \begin{pmatrix} b_1 & b_2 & b_3 \end{pmatrix}$$

$$\cos\theta = \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{|\vec{op}| * |\vec{op'}|}$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3}{|\vec{op}| * |\vec{op'}|} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} n_x n_x (1-\cos\theta) + \cos\theta & n_x n_y (1-\cos\theta) - n_z \sin\theta & n_x n_z (1-\cos\theta) + n_y \sin\theta \\ n_x n_y (1-\cos\theta) + n_z \sin\theta & n_y n_y (1-\cos\theta) + \cos\theta & n_y n_z (1-\cos\theta) - n_x \sin\theta \\ n_x n_z (1-\cos\theta) - n_y \sin\theta & n_y n_z (1-\cos\theta) + n_x \sin\theta & n_z n_z (1-\cos\theta) + \cos\theta \end{pmatrix} \quad (3)$$

ローカル座標系内で，任意のリンク L を x 軸回りに θ_{kx}，y 軸回りに θ_{ky}，z 軸回りに θ_{kz} 回転させるための回転行列は，それぞれ式(4)のように表すことができる．

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_x & -\sin\theta_x \\ 0 & \sin\theta_x & \cos\theta_x \end{pmatrix}$$

$$M_y = \begin{pmatrix} \cos\theta_y & 0 & \sin\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_y & 0 & \cos\theta_y \end{pmatrix} \tag{4}$$

$$M_z = \begin{pmatrix} \cos\theta_z & -\sin\theta_z & 0 \\ \sin\theta_z & \cos\theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

回転順番としては，まず初めに z 軸回りに θ_z，次に y 軸回りに θ_y，最後に x 軸回りに θ_x の順にリンクを回転させる場合，回転行列 M は式(5)で表される．

$$\begin{aligned} M &= M_z * M_y * M_x \\ &= \begin{pmatrix} C_yC_z & -C_xS_z + S_xS_yC_z & S_xS_z + C_xS_yC_z \\ C_yS_z & C_xC_z + S_xS_z & -S_xC_z + C_xS_z \\ -S_y & S_xC_y & C_xC_y \end{pmatrix} \end{aligned} \tag{5}$$

ただし，記号 $Cx=cos\theta_x$，$Sx=sin\theta_x$　$Cy=cos\theta_y$，$Sy=sin\theta_y$，　$Cz=cos\theta_z$，$Sz=sin\theta_z$

式(4)と式(5)の 3 行 1 列目，1 行 1 列目，3 行 3 列目より θx　θy　θz を求める．θx　θy　θz は式(6)のように示される．

$$\theta_y = \sin^{-1}\{-n_xn_z(1-\cos\theta) + n_y\sin\theta\}$$

$$\theta_x = \cos^{-1}\{(-n_zn_z(1-\cos\theta) + \cos\theta)/\cos\theta_y\} \tag{6}$$

$$\theta_z = \cos^{-1}\{(-n_xn_x(1-\cos\theta) + \cos\theta)/\cos\theta_y\}$$

以上の手順を各リンクに対して行いそれぞれの回転角度を求めていく．

3.3　作業姿勢再現

3.2 節では，録画した対象作業の動画における各シーンの作業者の関節曲げ角度を取得する手順を述べた．このデータを本装置に読み込むことで各シーンの作業者の姿勢が仮想作業域内のデジタルヒューマンモデルにより表示される．以下に動作計画の手順を示す．

(ｉ)作業姿勢の作成

作業者の各シーンの関節曲げ角度を読み込むことで，仮想作業域内のデジタルヒューマンが各シーンにおいて読み込んだ関節曲げ角度の姿勢をとる．このとき，録画された実際の作業者の姿勢とデジタルヒューマンの姿勢が，異なる場合がある．その場合はマウスおよびキー操作により姿勢を修正できる．

また，仮想作業域およびデジタルヒューマンは 4 つの別の視点から見た 4 画面で表示される．1 画面表示では，単一方向からしか作業状況を確認できないため，正確な作業姿勢か否かの判断が難しい．各動作を終えた時点で視点を変更し，次の動作を始めなければならない．そのため 4 画面構成にすることで視点変更を最小限にし，操作を容易に行えるようにしている．以下に各画面を説明する．任意視点の画面では自由に視点を動かせるが，それ以外の画面は上下左右方向および拡大・縮小しか動かせない．本装置の操作画面を図 11 に示す．

① 上面からの視点　　：　仮想作業域を上から見た状態を表示する.
② 右側からの視点　　：　仮想作業域を右手側から見た状態を表示する.
③ 背面からの視点　　：　仮想作業域をデジタルヒューマンの背後から見た状態を表示する.
④ 任意の視点　　：　任意の状態での表示する. 視点を自由に動かすことができる.

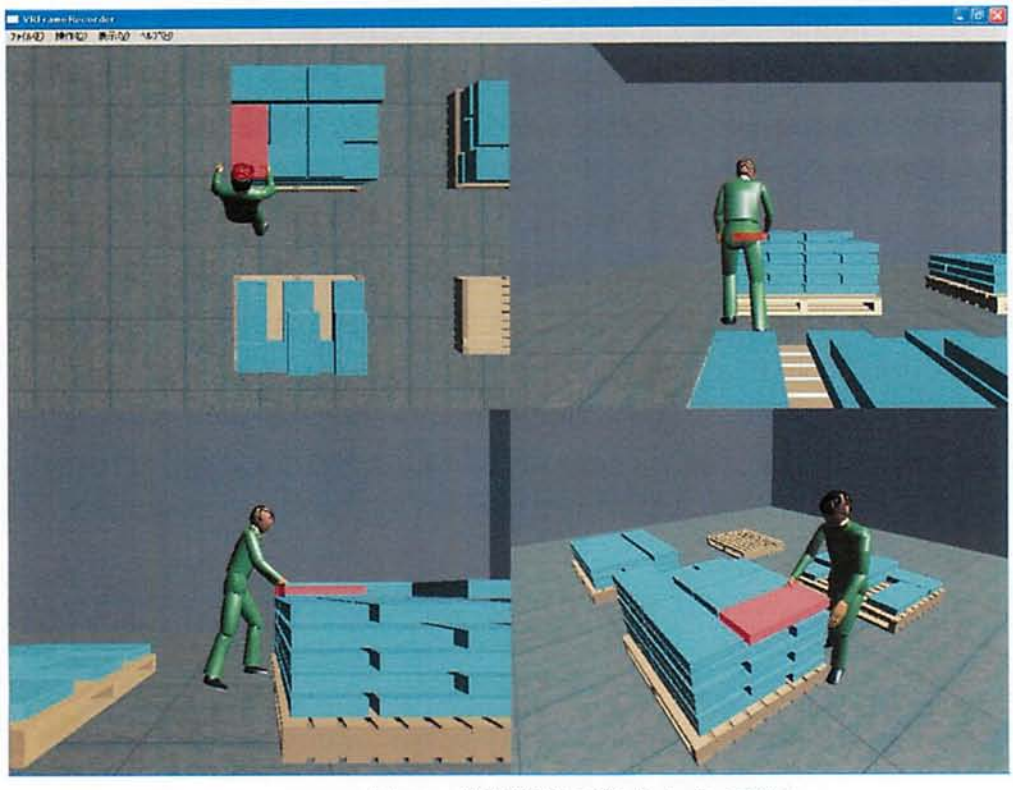


図 11. 作業姿勢の作成メイン画面

(ⅱ)作業の再現

各シーンにおいて作成された作業姿勢のシーン間の姿勢を補間し, デジタルヒューマンが実際の作業者と同じタイミングで同じ作業を行う. このとき, 姿勢評価に必要な関節座標と関節曲げ角度のデータが連続して CSV 形式で出力される. 出力座標系を図 12 に示す.

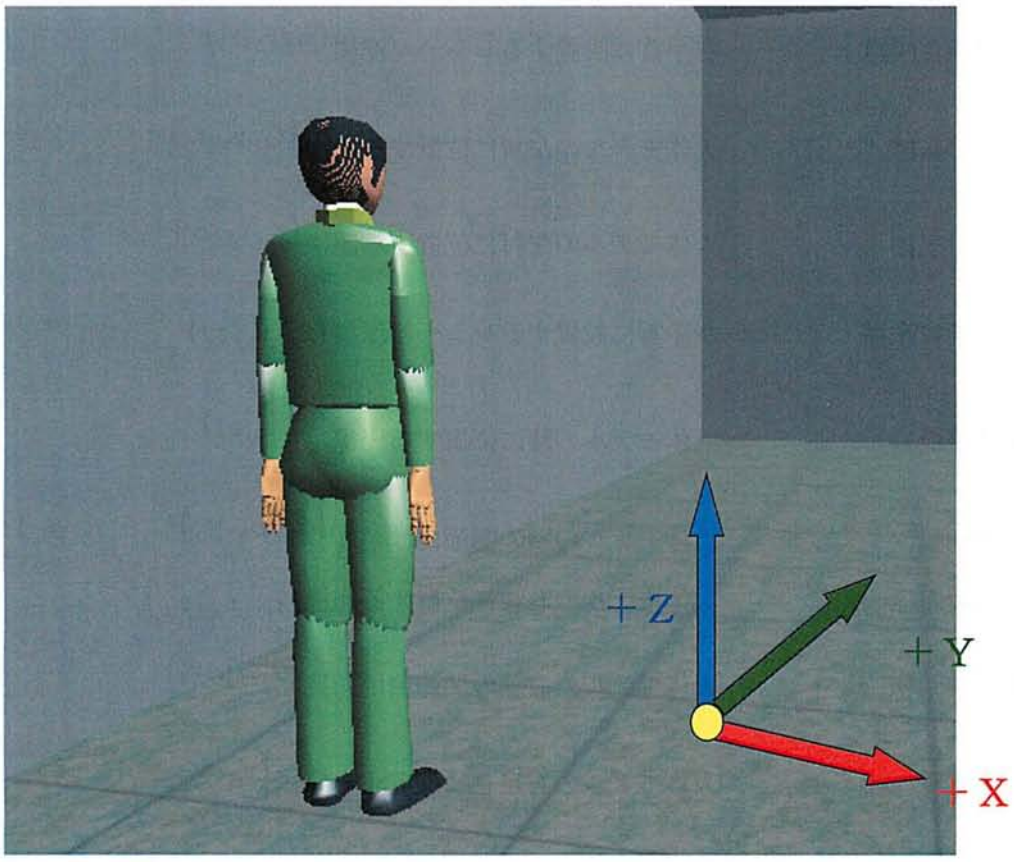


図 12. 出力座標系

また，出力される情報を以下に示す．情報の区切りはカンマ区切りとし，1 行を 1 レコードとして出力する．

ファイル名には「出力現在時間」を使用する．また，保存形式は「.csv」とする．出力する各種位置データは cm 単位，角度データは度単位，経過時間は秒単位とする．

① 経過時間 : 開始からの経過時間 t

② モデル頭部座標 : 頭部に設置するレシーバ座標 (x_1, y_1, z_1)

③ モデル背中座標 : 背中に設置するレシーバ座標 (x_2, y_2, z_2)

④ モデル背中前後回転 : 背中レシーバの回転度 $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$

⑤ モデル右肩座標 : 人体モデルの右肩に位置する座標 (x_3, y_3, z_3)

⑥ モデル右肘座標 : 人体モデルの右肘に位置する座標 (x_4, y_4, z_4)

⑦ モデル右手首座標 : 右手首に設置するレシーバ座標(x_5, y_5, z_5)

⑧ モデル左肩座標 : 人体モデルの左肩に位置する座標(x_6, y_6, z_6)

⑨ モデル左肘座標 : 人体モデルの左肘に位置する座標(x_7, y_7, z_7)

⑩ モデル左手首座標 : 左手首に設置するレシーバ座標(x_8, y_8, z_8)

⑪ モデル腰座標 : 人体モデルの腰に位置する座標(x_9, y_9, z_9)

⑫ モデル腰回転 : 人体モデルの腰の関節曲げ角度$(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$

⑬ モデル右膝座標 : 人体モデルの右膝に位置する座標(x_{10}, y_{10}, z_{10})

⑭ モデル右膝回転 : 人体モデルの右膝の関節曲げ角度$(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)$

⑮ モデル右足首座標 : 人体モデルの右足首に位置する座標(x_{11}, y_{11}, z_{11})

⑯ モデル右足首回転 : 人体モデルの右足首の関節曲げ角度$(\alpha_4, \beta_4, \gamma_4)$

⑰ モデル左膝座標 : 人体モデルの左膝に位置する座標(x_{12}, y_{12}, z_{12})

⑱ モデル左膝回転 : 人体モデルの左膝の関節曲げ角度$(\alpha_5, \beta_5, \gamma_5)$

⑲ モデル左足首座標 : 人体モデルの左足首に位置する座標(x_{13}, y_{13}, z_{13})

⑳ モデル左足首回転 : 人体モデルの左足首の関節曲げ角度$(\alpha_6, \beta_6, \gamma_6)$

㉑ 右把持部品座標 : 右手で持つ部品の座標(x_{14}, y_{14}, z_{14})

㉒ 右把持部品回転 : 右手で持つ部品の回転度$(\alpha_7, \beta_7, \gamma_7)$

㉓ 左把持部品座標 : 左手で持つ部品の座標(x_{15}, y_{15}, z_{15})

㉔ 左把持部品回転 : 左手で持つ部品の回転度$(\alpha_8, \beta_8, \gamma_8)$

㉕ 右下肢関節曲げ角度 : 人体モデルの右膝の関節曲げ角度$(\alpha_8, \beta_8, \gamma_8)$

㉖ 左下肢関節曲げ角度 : 人体モデルの左膝の関節曲げ角度$(\alpha_9, \beta_9, \gamma_9)$

(iii)作業の再設計

(iv)で述べる作業姿勢評価判定を行ったのち，要改善姿勢があれば(ｉ)の手順に戻り，作業姿勢を再設計する．この手順を繰り返すことで作業姿勢の少ない動作が計画される．

(iv)作業姿勢評価

ここでは，モーションキャプチャによって得られた各関節の曲げ角度データや，荷重(重さや発揮する力)や時間(持続時間など)の要因も併せて作業姿勢を検討する．

上記のデータをOWAS法に基づいた評価式に入力することにより，作業姿勢評価を行う．評価式では，現実に則していない姿勢が入力された場合，判定が不能とされる．

3.4　姿勢コード判定条件

詳しい姿勢コードの判定条件については以下で解説する．

①　背部

（ｉ）「曲がっている」というのは，体幹部に20度以上の前屈，後屈，側屈，ひねりがあればそのように判断する．これより少ないわずかな曲げは曲がっていないとする．この角度は頭部と骨盤を結ぶ線が鉛直方向となす角度である．

（ii）　ここはあくまで体幹部の評価である．首のみの前屈や後屈あるいは脚のみのひねりはこれに含まれない．

②　上肢

（ｉ）　腕が肩より上とは，手・前腕・上腕のいずれかが肩と同じ高さあるいはそれより上にある場合が該当する．

（ii）　ただし体幹前傾がある場合(背部がIIやIV)は，手・前腕・上腕のいずれかが肩より上にある場合のみ「上にある」と判断する．

③　下肢

（ｉ）　脚が曲がっているというのは，膝の角度が150度以下(股関節－膝－足首のなす角度.膝がまっすぐな状態が180度で,膝が曲がるほど小さくなる)であることをいう．これより少ないわずかな曲げは曲がっていないと判断する．

（ii）「座る」は，イス・机・バーなどに腰掛けた状態で，あくまで体重はお尻で受けている必要がある．壁に寄りかかる，手やおなかの部分でもたれかかる，寝る，床に座る(正座や胡座)はこれに含まれない．

（iii）「両脚をまっすぐにして立つ」は，両脚が曲がっていなくて両脚で体重を支えている状態．爪先立ちや長時間立位の際にみられる体重を脚の間でかけかえる動作時はこれに含める．歩行時など体が移動している最中はこれに含めない．

(iv) 「重心をかけている片脚をまっすぐにして立つ」は，曲がっていない片足で体重を支え，もう片方の足が床から浮いている状態．体重を支えていない足は主にバランスを取るなど，仕事で使用されている．移動中の姿勢や長時間立位の際の体重のかけかえ，バーにお尻で腰掛けている状態はこれに含まれない．

(v) 「両膝を曲げて立つか中腰」は，いわゆる中腰の状態であるが，両脚で体重が支えられていなければならない．膝やお尻が床につかない蹲踞の姿勢もこれに含まれる．

(vi) 「重心をかけている片脚を曲げて立つか中腰」は，曲がっている片足で体重を支えた状態．もう片方の足は体重を支えてない状態でなければならない．歩行中の姿勢は含めない．

(vii) 「片方または両方の膝を床に付ける」は，いわゆる膝立ちや片膝立ちの姿勢である．膝が床につかない蹲踞の姿勢はこれに含まれない．

(viii) 「歩くまたは移動する」は，あくまで移動がなければならない．前方だけでなく，後ろ歩きや横歩き，階段昇降も含まれる．当然，台車等を押しながらの歩行も含まれる．

3.5　姿勢コードの判別式

出力された作業者の動作情報をもとに姿勢コードの値を導き出す．実際に本装置で使用する背部，上肢の項目の条件式を次に示す．ただし，座った状態での作業は対象外とし，下肢コードは(Ⅰ)以外とする．

① 背部

背部の姿勢の判別には出力情報のうち背中関節曲げ角度(α_1，γ_1)腰関節曲げ角度(γ_2)を用いる．背部のひねりの角度は$\gamma_1-\gamma_2$とし，この背部のひねり角度をγとする．

α_1，γの角度を図 13 に示す

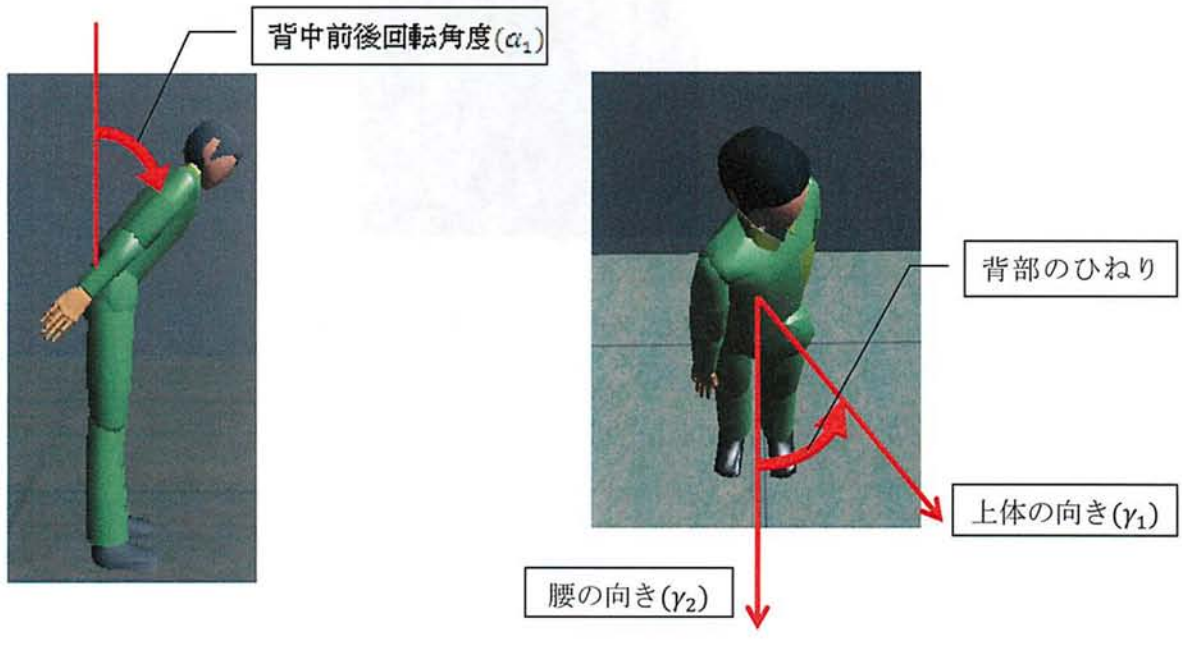


図 13.　条件式に用いる　背部前後関節曲げ角度と背部のひねり角度

（ｉ） 背中が「まっすぐ」

「背中がまっすぐ」の状態の姿勢の判別，条件を式(7)に示す(図 14).

$$-20 < \alpha_1 < 20 \qquad (7)$$



図 14. 背中が「まっすぐ」の姿勢

（ii） 背部を「前または後ろに曲げる」

「背部を前または後ろに曲げる」状態の姿勢の判別，条件を式(8)に示す(図 15).

$$(\alpha_1 \leq -20) \cup (20 \leq \alpha_1) \qquad (8)$$



図 15. 背部を「前または後ろに曲げる」姿勢

(iii) 背部を「ひねるまたは横に曲げる」

「背部をひねるまたは横に曲げる」状態の姿勢の判別，条件を式(9)に示す(図 16).

$$(\gamma \leq -20) \cup (20 \leq \gamma) \qquad (9)$$



図 16. 背部を「ひねるまたは横に曲げる」姿勢

(iv) 背部を「斜め前に曲げる」

「背部を斜め前に曲げる」状態の姿勢の判別，条件を式(10)に示す(図 17).

$$[(\alpha_1 \leq -20) \cup (20 \leq \alpha_1)] \cap [(\gamma \leq -20) \cup (20 \leq \gamma)] \qquad (10)$$



図 17. 背部を「斜め前に曲げる」姿勢

② 上肢

上肢の姿勢の判別には，出力情報のうち右肩座標，右肘座標，右首座標，左肩座標，左肘座標，左手首座標の各 z 軸に対する座標を用いる．右肩座標を(z_3)，右肘座標を(z_4)，右手首座標を(z_5)とする．左肩座標を(z_6)，左肘座標を(z_7)，左手首座標を(z_8)とする．

（i）「両腕とも肩より下」

「両腕とも肩より下」の状態の姿勢の判別，条件を式(11)に示す(図 18)．

$$(z_3 > z_4) \cap (z_3 > z_5) \cap (z_6 > z_7) \cap (z_6 > z_8) \qquad (11)$$

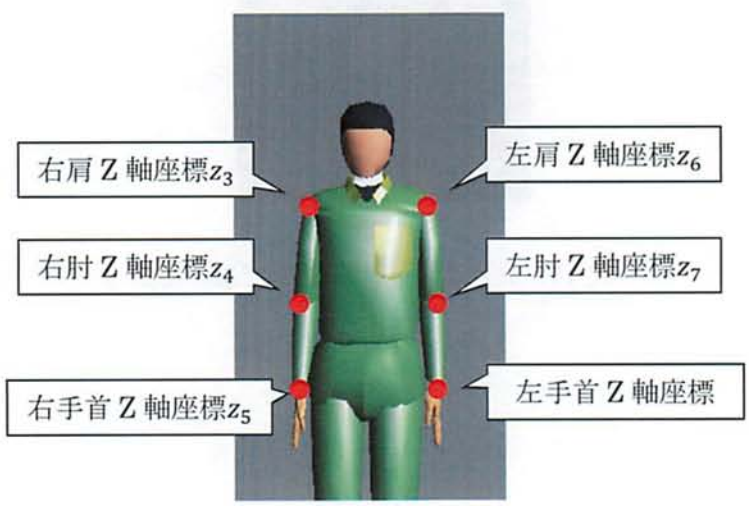


図 18　「両腕とも肩より下」の姿勢

（ii）「片腕が肩の高さあるいはそれより上」

「片腕が肩の高さあるいはそれより上」状態の姿勢の判別，条件を式(12)に示す(図 19).

$$[(z_4 \geq z_3) \cup (z_5 \geq z_3)] \cup [(z_7 \geq z_6) \cup (z_8 \geq z_6)] \quad (12)$$

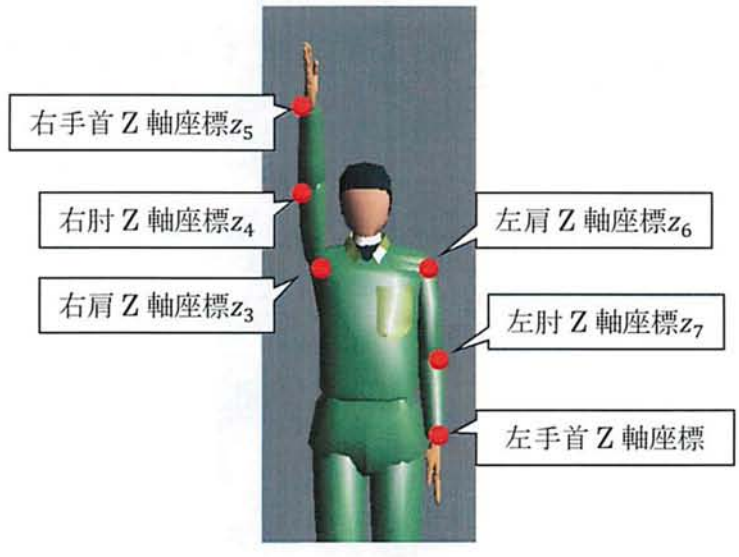


図 19.　「片腕が肩の高さあるいはそれより上」の姿勢

(iii) 「両腕が肩の高さあるいはそれより上」

「両腕が肩の高さあるいはそれより上」状態の姿勢の判別，条件を式(13)に示す(図 20).

$$[(z_4 \geq z_3) \cup (z_5 \geq z_3)] \cap [(z_7 \geq z_6) \cup (z_8 \geq z_6)] \quad (13)$$

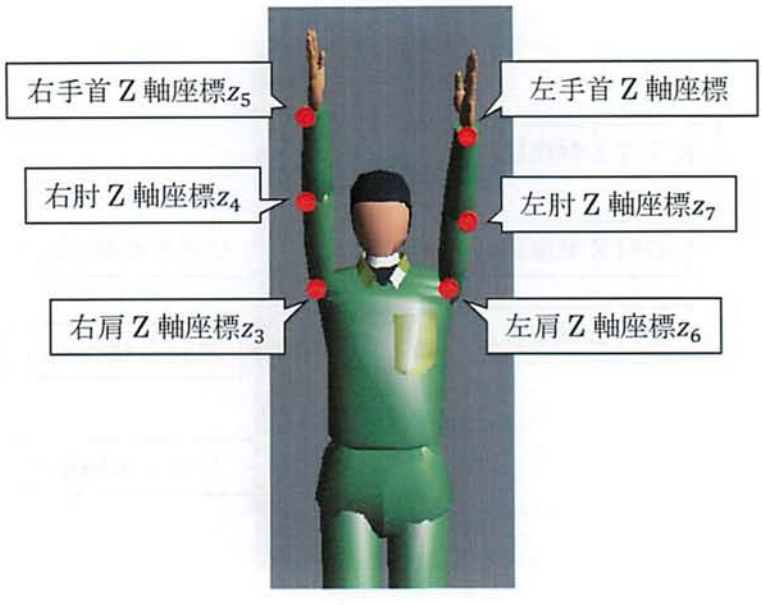


図 20. 「両腕が肩の高さあるいはそれより上」の姿勢

③　下肢

上肢同様に，下肢についても出力情報をもとに姿勢コードの値を導き出す．座標軸は図 12 の通りであり，地面の Z 軸座標を 0 としている．なお，足の裏から足首の z 座標(z_{11}，z_{13})までの長さをd(cm)とする．

また，以下の条件式中における膝の角度は図 21 に示す部分の角度を用いる．右膝の角度をα_3，左膝の角度はα_5とする．式(14)，(15)で示される．

$$\alpha_R = \cos^{-1}\left[\frac{(x_9-x_{10})(x_{11}-x_{10})+(y_9-y_{10})(y_{11}-y_{10})+(z_9-z_{10})(z_{11}-z_{10})}{\sqrt{\left[(x_9-x_{10})^2+(y_9-y_{10})^2+(z_9-z_{10})^2\right]\left[(x_{11}-x_{10})^2+(y_{11}-y_{10})^2+(z_{11}-z_{10})^2\right]}}\right] \quad (14)$$

$$\alpha_L = \cos^{-1}\left[\frac{(x_9-x_{12})(x_{13}-x_{12})+(y_9-y_{12})(y_{13}-y_{12})+(z_9-z_{12})(z_{13}-z_{12})}{\sqrt{\left[(x_9-x_{12})^2+(y_9-y_{12})^2+(z_9-z_{12})^2\right]\left[(x_{13}-x_{12})^2+(y_{13}-y_{12})^2+(z_{13}-z_{12})^2\right]}}\right] \quad (15)$$

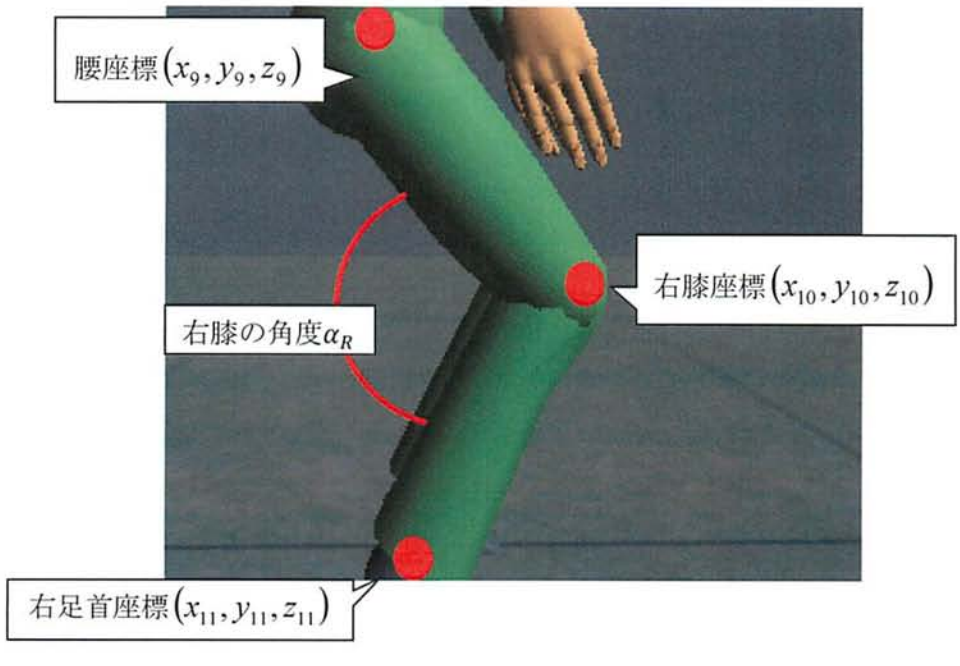


図 21．条件式中に用いる膝の角度

(ｉ)両脚をまっすぐにして立つ

OWAS 法の判定条件より，両足が接地し($z-d=0$)，かつ膝がまっすぐな状態である．膝がまっすぐな状態ということは，OWAS 法の判定条件より，上記で示した膝の角度が 150 度以上かつ 180 度以内のことである．この条件式は式(16)で表される．

式(16)が満たされる時，姿勢は「両脚をまっすぐにして立つ」であると判別する(図 22).

$$\left(z_{11}-d=z_{13}-d=0\right)\bigcap(150\le\alpha_R\le180)\bigcap(150\le\alpha_L\le180) \qquad (16)$$



図 22.　「両脚をまっすぐにして立つ」姿勢

(ii)両膝を曲げて立つか中腰

OWAS 法の判定条件より，両足が接地し($z-d=0$)，かつ両膝が曲がっている(両膝の角度が 150 度以内)状態である．この条件式は式(17)で表される．

式(9)が満たされる時，姿勢は「両膝を曲げて立つか中腰」であると判別する(図 23).

$$\left(z_{11}-d=z_{13}-d=0\right)\bigcap(0\le\alpha_3\le150)\bigcap(0\le\alpha_5\le150) \qquad (17)$$



図 23.「両膝を曲げて立つか中腰」姿勢

(iii)片方または両方の膝を床につける

この姿勢は 3.4 節の(3)の③から OWAS 法の判定条件より，両膝の Z 軸座標が地面と同じになる状態である．

「片方または両方の膝を床につける」状態の姿勢(図 24)の判別，　条件を式(18)に示す．

$$(z_{10} = z_{12} = 0) \cup [(z_{10} = 0) \cap (0 \le z_{12})] \cup [(z_{12} = 0) \cap (0 \le z_{10})] \tag{18}$$



図 24.「片方または両方の膝を床につける」姿勢

(iv)歩くまたは移動する

この条件を作成する場合は,「歩くまたは移動」(図 25)をしている時間を指定して, 下肢姿勢評価を設定する.



図 25.「歩くまたは移動する」姿勢

（v）重心をかけている片脚をまっすぐにして立つ

OWAS 法の判定条件より，片方の脚のみ地面に着き $(z-d=0)$，接地している片脚がまっすぐ(膝の角度が 150 度以上かつ 180 度以内)になっている状態である．この条件式は式(19)で表せる．式(19)が成り立つ時，姿勢は「重心をかけている片脚をまっすぐにして立つ」であると判別する(図 26)．

$$\begin{aligned}&\left((z_{11}-d=0)\bigcap(z_{11}\le z_{13})\right)\bigcap(150\le\alpha_R\le180)\bigcup\\&\left((z_{13}-d=0)\bigcap(z_{13}\le z_{11})\right)\bigcap(150\le\alpha_L\le180)\end{aligned}\tag{19}$$



図 26. 重心をかけている片脚をまっすぐにして立つ姿勢

（vi）重心をかけている片脚を曲げて立つ

この姿勢は 3.4 節の(3)の③から OWAS 法の判定条件より，片方の脚のみ地面に着き $(z-d=0)$，接地している脚の膝が曲がっている(膝の角度が 150 度以内)状態および，両脚が地面に着き且つ，片脚のみ曲がっている(膝の角度が 150 度以内) 状態である．

この条件式は式(20)で表せる．式(20)が成り立つ時，姿勢は「重心をかけている片脚を曲げて立つ」(図 27).

$$\{(z_{11}-d=0)\bigcap(z_{11}\leq z_{13})\bigcap(0\leq\alpha_R\leq 150)\}\bigcup$$
$$\{(z_{13}-d=0)\bigcap(z_{11}\geq z_{13})\bigcap(0\leq\alpha_L\leq 150)\}$$

$$\{(z_{11}-d=0)\bigcap(z_{13}-d=0)\}\bigcap$$
$$[\{(0\leq\alpha_R\leq 150)\bigcap(150\leq\alpha_L\leq 180)\}\bigcup\{(150\leq\alpha_R\leq 180)\bigcap(0\leq\alpha_L\leq 150)\}] \quad (20)$$



図 27. 重心をかけている片脚を曲げて立つ姿勢

④ 重さまたは力

3.3 節(ii)の出力情報のうち，右把持部品座標(x_{14},y_{14},z_{14})，左把持部品座(x_{15},y_{15},z_{15})を用いて，部品を把持している時と，何も把持していない時を区別出来るようにする．ただし，把持部品重量により，姿勢コードは異なる．

4. Kinect を用いた対象作業の撮影

4.1 先行研究における課題

先行研究では座標の取得にマウスポイントを用いていた．マウスポイントによる作業設計では，マウスを用いて実際の作業動画から身体の各部位の座標を取得し，それぞれの角度を算出することで，作業姿勢を作成する．しかし，作業動画を撮影するのに，カメラ 4 台，動画を見るのに必要な 4 画面分割ユニット，ビデオキャプチャー，キャリブレーションを行うのに必要な基準立法フレームといった多くの機材を必要としていた．機材の配置には 8m 四方の広さが必要であり，倉庫などの作業環境において，適用しづらい．以下の図 28 に撮影時の機材の配置、図 29 にレイアウトを示す．

また，フレームレート 30/s の静止画それぞれに対して，身体の各関節をカメラ 4 台すべてに対して，手動でポインタしなければならないため，姿勢評価するのに非常に時間がかかっていた.以下の図 30 に、マウスポイントの一場面を示す．



図 28. 撮影機材配置

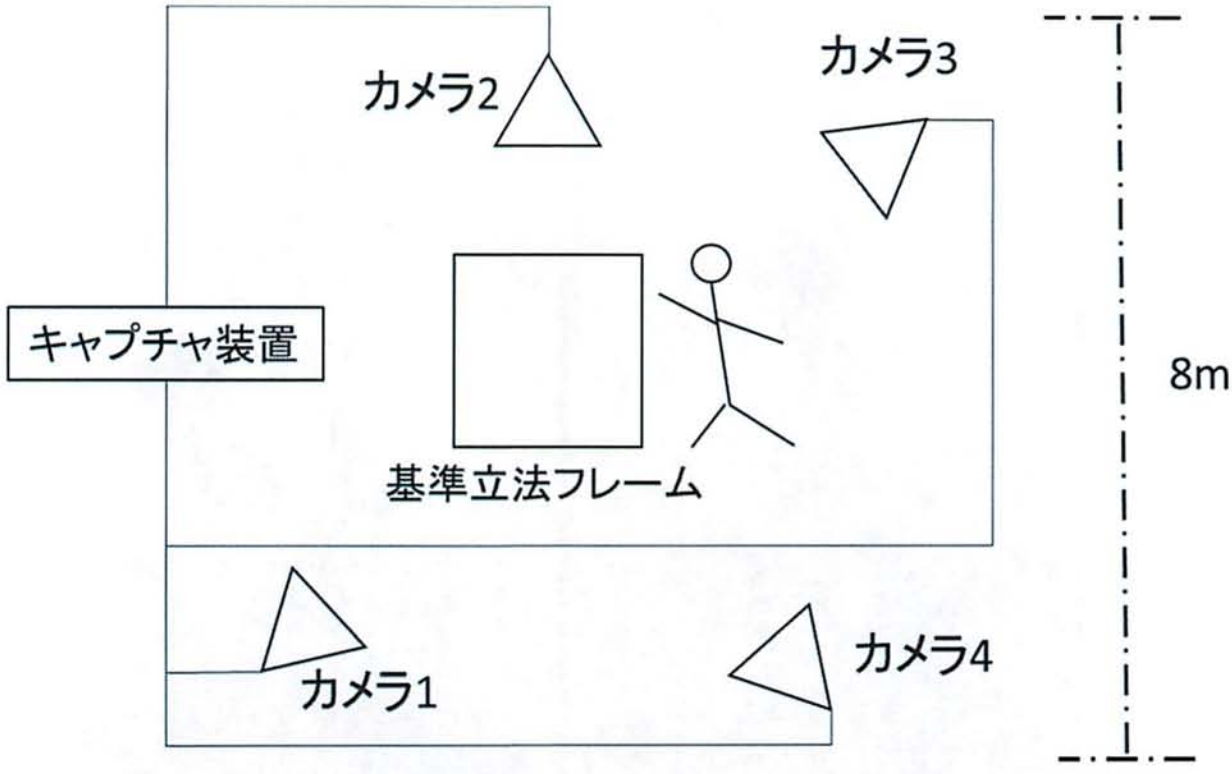


図 29. 撮影レイアウト

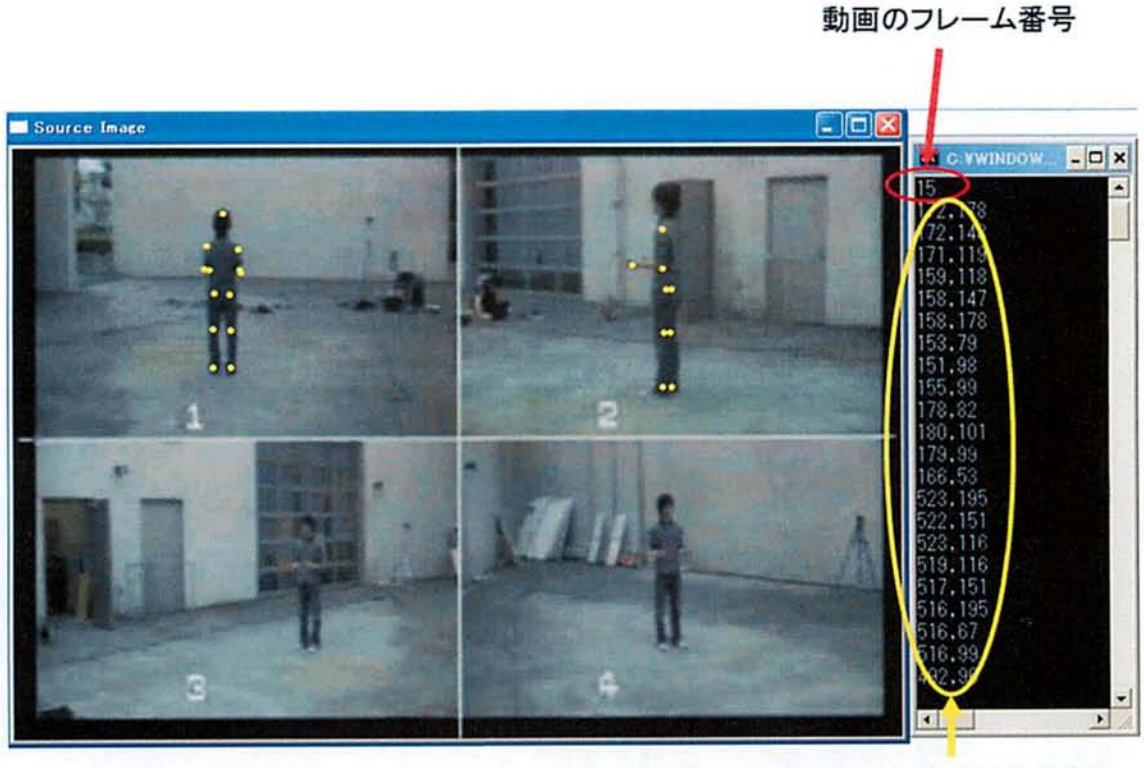


図 30. マウスポイントの一場面

4.2　Kinect for Windows の作業姿勢キャプチャ適用

上記のマウスポインタを用いたキャプチャ手法とは異なり，Kinect は作業者の姿勢を撮影するだけで，身体の各関節 20 点の座標を連続で自動取得することができる．そのため大幅な時間短縮が可能になることが考えられる．以下の図 31 に，ある作業の撮影シーンを示す．

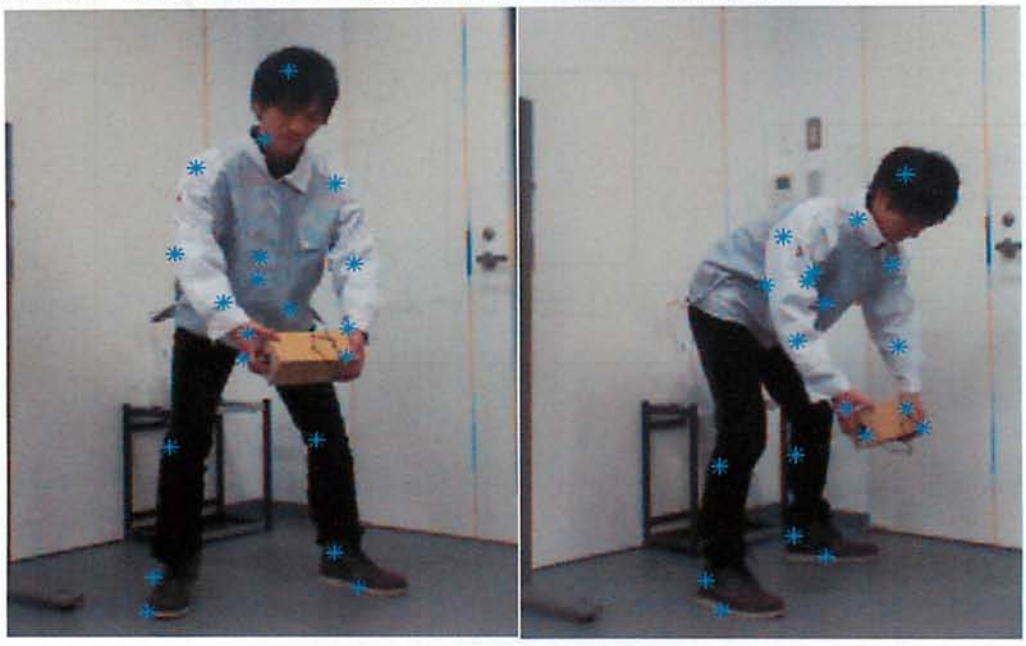


図 31．Kinect による作業撮影

4.3　2 台の Kinect による撮影

4.3.1　Kinect カメラの配置

本研究は，主に倉庫内等の荷役作業を対象としている．そのため，以下の図 32 のように，カメラの角度によっては，作業者の半身や腕が荷台や作業者の身体自体で遮蔽されてしまい，正確にキャプチャすることができないシーンが多々存在する．

そのような場合を想定し，本システムにおいては 2 台の Kinect を角度を変えて配置し撮影する．一方の Kinect では可視できない作業者の部位を，もう一方の Kinect により捕らえることができる．

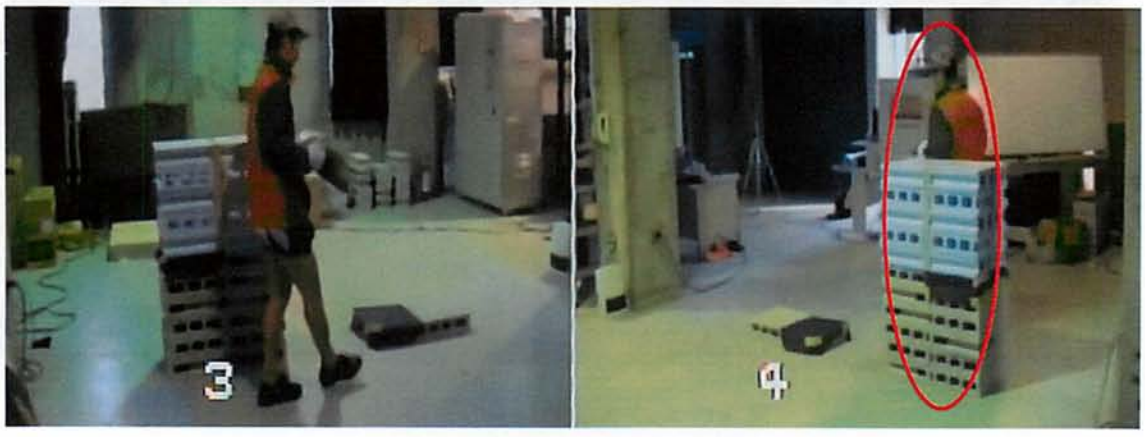


図 32．遮蔽物が存在するシーン

4.3.2 キャリブレーション

本システムにおいては 2 台の Kinect を用いるが，それぞれの視点により座標軸が異なるため，キャリブレーションを行う．これには，2 つの Kinect カメラから対象物(頭)までの線分の角度を用いる．

以下の図 33 のようなシーンを撮影する場合，Kinect2 と対象物との距離，Kinect1 と対象物の距離，Kinect 同士の距離をそれぞれ(l,n,m)とすると，式 21 により，2 つの Kinect カメラから対象物(頭)までの線分の角度 θ が求まる．

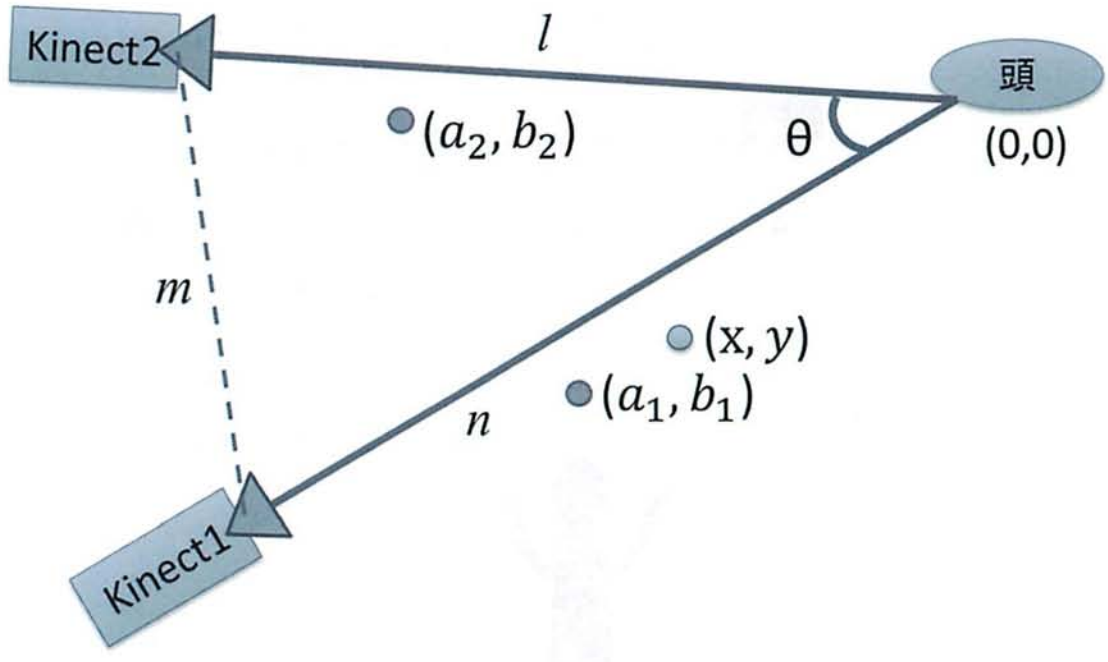


図 33. Kinect によるキャリブレーションモデル

$$cos\theta = \frac{l^2+n^2-m^2}{2*l*n} \qquad (21)$$

ある部位の，Kinect1 の座標軸による座標を(a_1, b_1)，Kinect2 の座標軸による座標を(a_2, b_2)とすると，(a_2, b_2)の Kinect1 の座標軸に変換した座標(x, y)は，頭部の座標が(0,0)になるように平行移動すると，式 22 によって表される．

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xcos\theta - ysin\theta \\ xsin\theta + ycos\theta \end{bmatrix} \qquad (22)$$

4.4　模擬作業への適用

荷役作業の模擬作業を行い，Kinect2 台，ビデオカメラにて一連の動作を撮影した．そのうち任意の 100 シーンを対象に，産業医に各シーンの姿勢コードおよび AC コードを判定していただいた．模擬作業の手順および内容を以下の図に示す．把持対象物である箱の質量は 3[kg]である．作業場のレイアウトを図 34 に示す．

対象とする作業例を以下に示す．

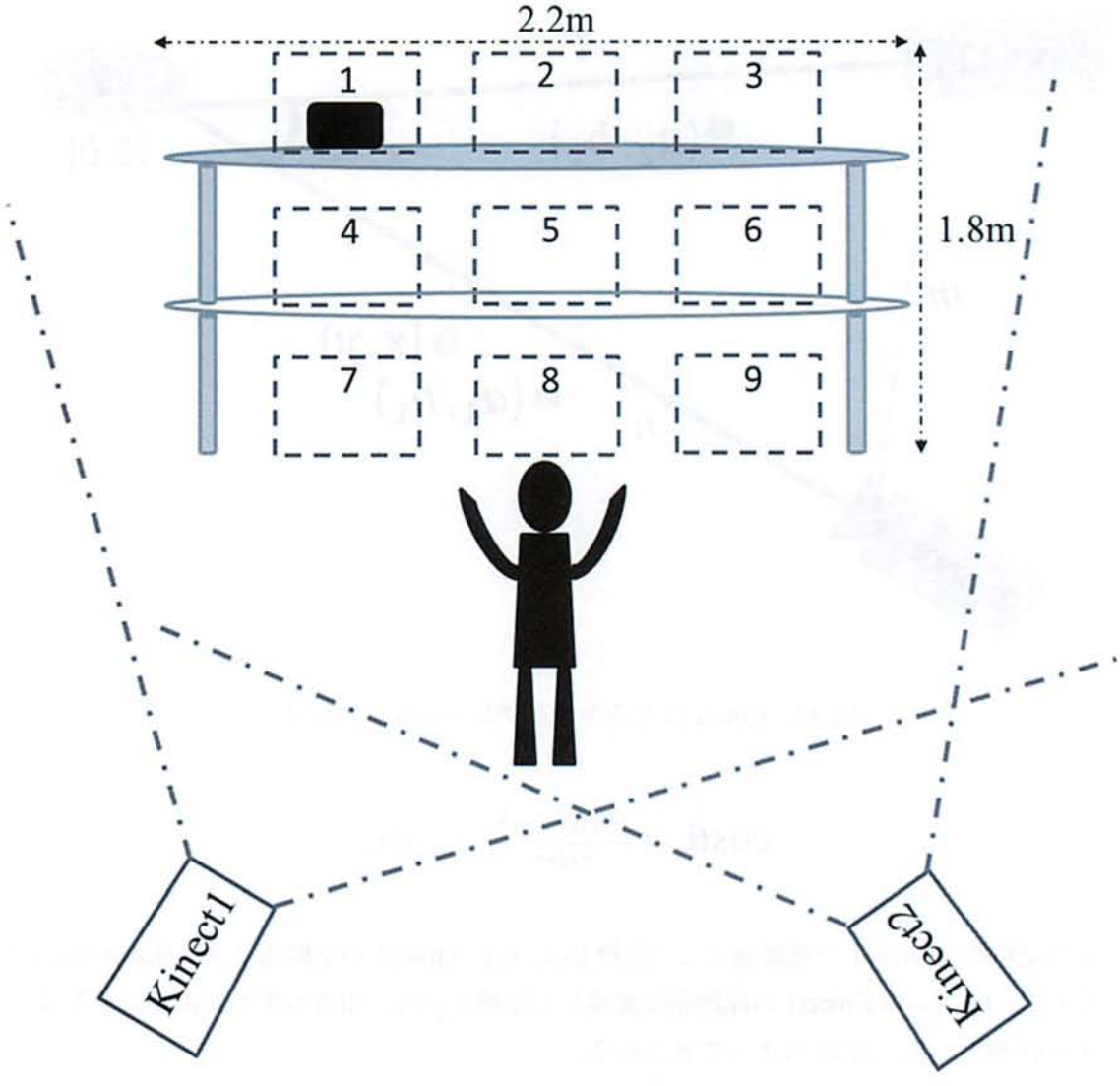


図 34．模擬作業レイアウト

被験者は，図の 1→3，3→4，4→9，…，7→1 のように，対象物を各ロケーションに移動させていく作業を行う．総作業時間は 200 秒ほどである．

(1) 静止
直立した状態.

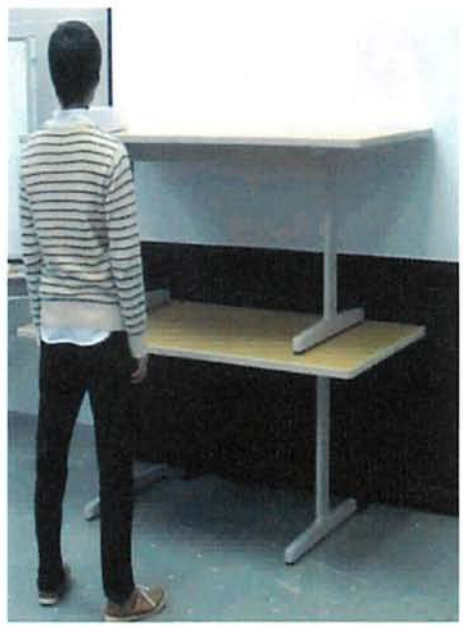


図 35. 作業場面

(2) 持ち上げ始め
箱を両手でつかむ.

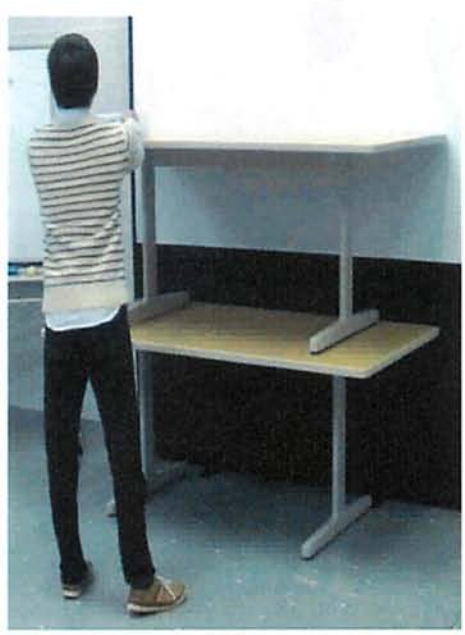


図 36. 作業場面

(3) 持ち上げ途中

箱を両手でつかみ，完全に浮いた状態にする．



図 37. 作業場面

(4) 置く

箱を両手でつかんだまま置く．



図 38. 作業場面

(5) 静止

直立した状態.

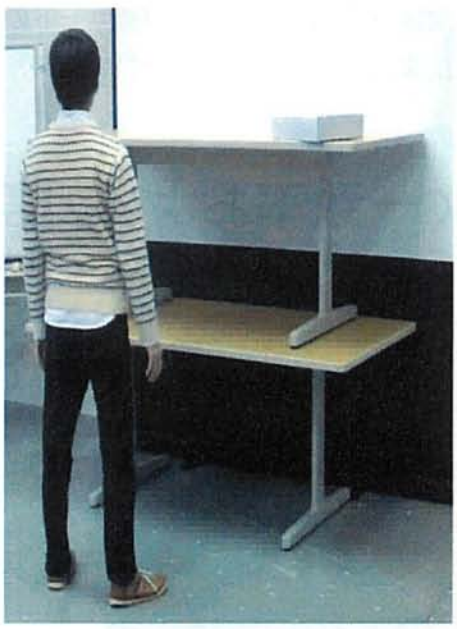


図 39. 作業場面

(6) 次の動作へ

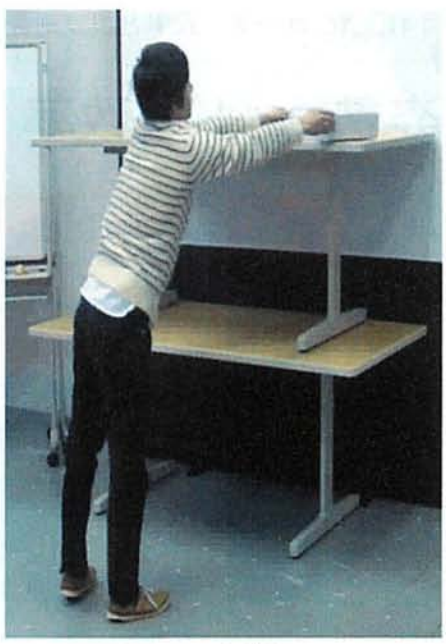


図 40. 作業場面

4.5　作業姿勢評価値の比較

模擬作業 100 シーンの姿勢を対象に，本システムによる各姿勢コードおよび AC コードの判定値と，100 シーン分の静止画からの産業医による判定値を比較した．

AC コードの一致率と判定誤差の割合，および各姿勢コードの一致率を示したものが以下の図 41，図 42 になる．今回，対象物の重さは 3kg と軽いため，重さの姿勢コードは全てのシーンで 1 となっている．

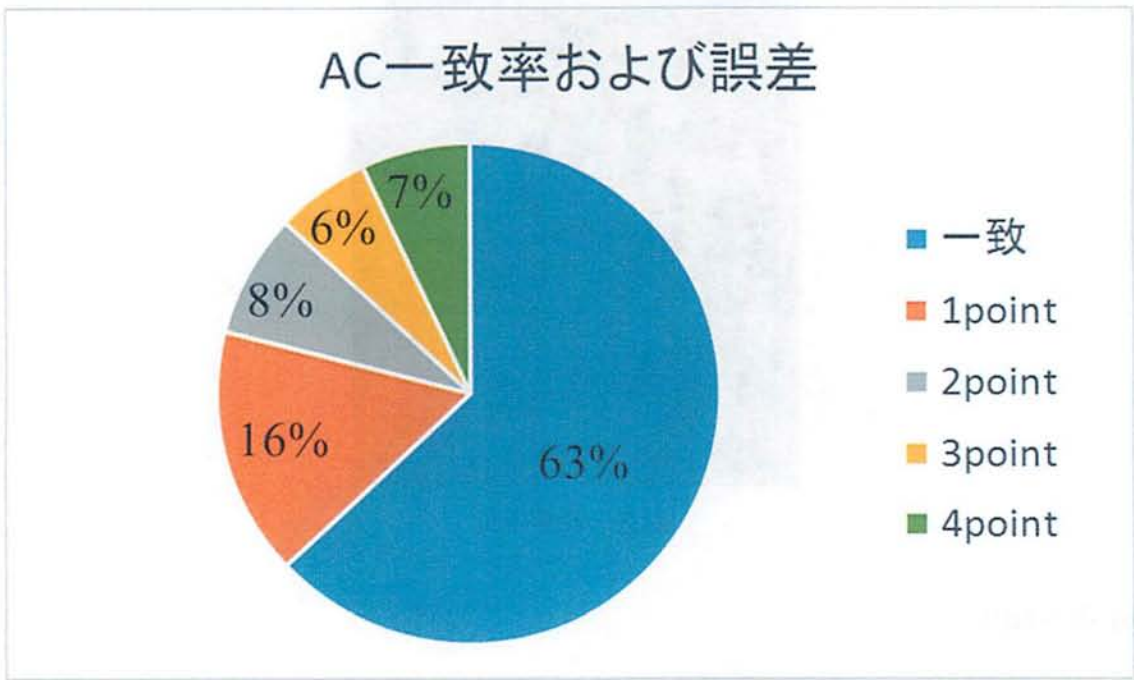


図 41．AC コード一致率と誤差割合

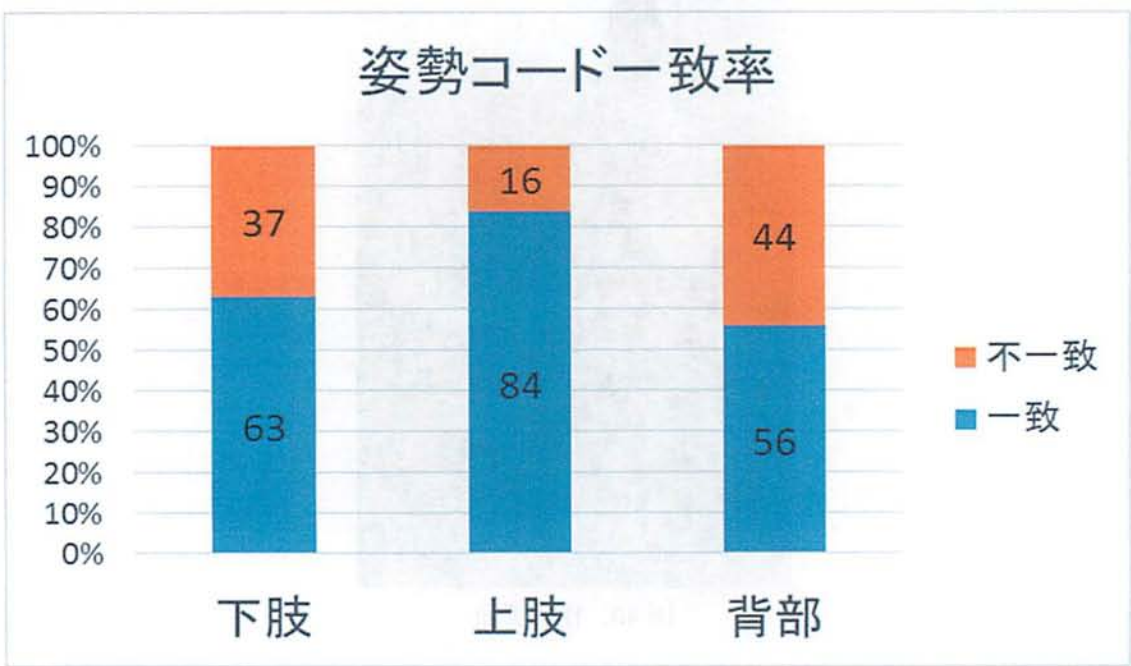


図 42．各姿勢コード一致率

以下の図 43 に，産業医と本システムの AC コード判定値の推移を示す．

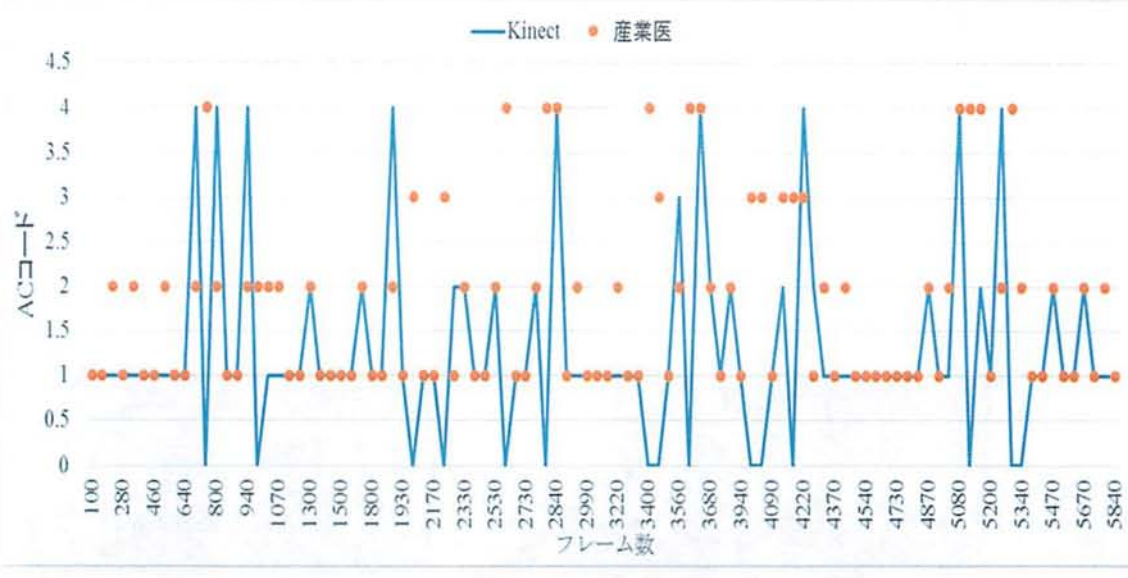


図 43．AC コード判定値推移

産業医と本システムの AC コードの一致率は 63%となっており，AC コードのズレの内訳(ズレの値)は，1 ポイントが 16%，2 ポイントが 8%，3 ポイントが 6%，4 ポイントが 7%となっている．

姿勢コードの一致率はそれぞれ，下肢が 63%，上肢が 84%，背部が 56%となっている．以下の図 44 に，先行研究(マウスポイント手法)による，荷役作業を対象とした AC コード判定値と産業医の判定値との一致率および判定誤差を示す．

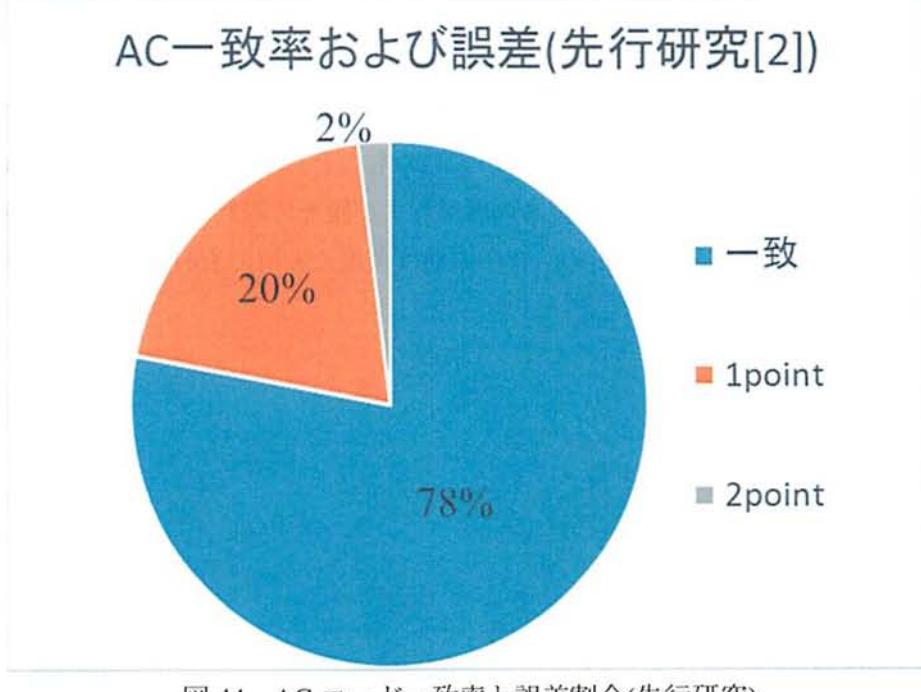


図 44．AC コード一致率と誤差割合(先行研究)

先行研究(マウスポイント手法使用)時の評価値一致率と比較して，本手法はACコードの一致率は15%低下していることがわかる．

一致率低下の要因としては，産業医がACコードを3または4と判定している姿勢において，本手法では1，または0(エラー)と判定してしまっていることが挙げられる．今回の作業ではそのような場面が合計13シーン確認された．

以下に，上記のような誤判定が生じやすいシーンを図45に示す



図45．誤判定の生じた姿勢例

図45の左側の姿勢においては，作業者の臀部に隠れて膝が見えていないことが分かる．そのため，脚部の座標および曲げ角度が実際のものと異なるシーンが存在する．

図45の右側の姿勢においては，作業者の臀部および腹部に隠れて，右肩および右肘が見えていないことが分かる．そのため，背中の曲げ角度や右肩，右肘の曲げ角度が正しく出力されない場合がある．

５．足首座標補正手法

5.1　誤判定要因の検討

第 4 章にて述べたように，作業姿勢より取得した座標データを用いて算出した各姿勢コードのうち，下肢姿勢コードが判定不能となっているシーンが多々存在する．

このようなコード判定不能なシーンが存在する要因としては，Kinect による作業姿勢撮影の際，下肢姿勢コード算出に用いる足首の座標が正しく取得できていないことが考えられる．足首の各軸座標(x,y,z)の値が判定条件外の値を示してしまうため，外れ値として処理されてしまう．

以下の図 46 に，作業中の両足首の取得 z 座標の推移を示す．

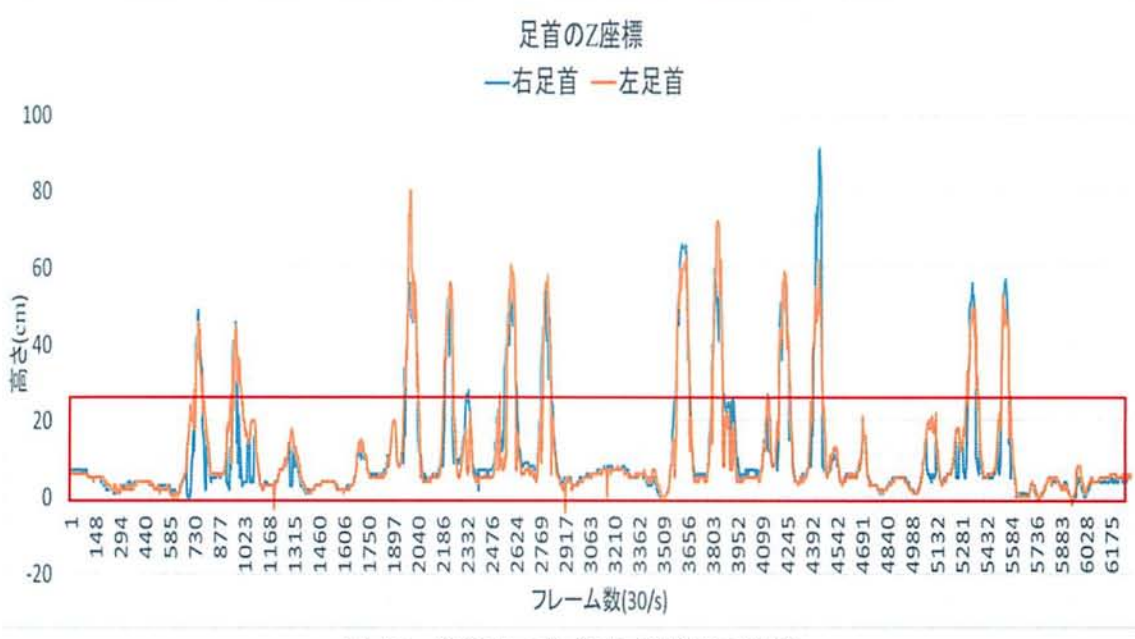


図 46.　作業中の取得足首座標の推移

本システムでは，座標変換により取得された座標データを，OWAS 法を組み込んだプログラムを通すことにより，各姿勢コードおよび AC コードを算出している．

下肢姿勢コードの判定においては，両足が浮いている状態(図 46 の赤枠外に両足首座標がある)と判断される場合には，座標に誤りがあるとしてコードの算出が行われない．

表 4.　下肢姿勢コードの外れ値割合

一致	不一致			
	外れ値	±1	±2	±3
63	15	13	5	4

表 4 で示される通り，100 シーン中の下肢姿勢コード不一致箇所は 37 存在するが，そのうち 15 シーンが外れ値と判定されていることがわかる．

5.2　重回帰分析の適用

上記のような問題を改善するため，ここではサンプリングした足首および各部位の座標を重回帰分析にかけることにより，両足首の x,y,z 座標を補正する回帰式を算出する．サンプリングには，被験者の動作よりランダムに 100 シーンを選び，マウスポイント手法により取得した座標を用いる．

重回帰分析の目的変数には，右足首の座標(今後それぞれ RANx,RANy,RANz と置く)，左足首の座標(今後それぞれ LANx,LANy,LANz)の 6 点を用いる．説明変数には，頭～股関節座標までの各座標，回転角の総計 45 点を用いる．最終的な回帰式は，増減法により，P<0.05 以外の説明変数を除去し，さらに回帰分析にかけたものとする．

AN を求める足首の値，x_jを各説明変数，a_iを各説明変数における回帰係数とする．これより，この重回帰分析による補正式のモデルは以下の式で表される．ただし，i,j は 1～45 までの自然数，C を定数とする．

$$\mathrm{AN} = a_1x_1 + a_2x_2 + \cdots + a_ix_j + C \tag{23}$$

これより，両足首の各座標に関する各回帰結果および補正式を表 5~10，式(24)~(29)に示す．

表 5．右足首の x 座標に関する重回帰

変　数	偏回帰係数	標準誤差	下限値	上限値	F　値	t　値	P　値	単相関	偏相関
頭ZZ	-0.203472	0.092917	-0.3879114	-0.01903	4.795339	-2.18983	0.030959	-0.04556	-0.21812
背中X	1.0115423	0.010202	0.99129081	1.031794	9830.361	99.14817	1.64E-98	0.994656	0.995153
左手首ZZ	0.133258	0.051238	0.03155059	0.234966	6.763873	2.600745	0.010773	-0.08091	0.256553
定数項	8.9714103	0.728333	7.52568139	10.41714	151.7266	12.31774	1.79E-21		

頭の z 軸周りの回転角を Hzz，背中の x 座標を Bx，左手首の z 軸周りの回転角を LWRzz とすると

$$\mathrm{RANx} = (-0.2035) * \mathrm{Hzz} + 1.0115 * \mathrm{Bx} + 0.1333 * \mathrm{LWRzz} + 8.9714 \tag{24}$$

表 6．右足首の y 座標に関する重回帰

変　数	偏回帰係数	標準誤差	下限値	上限値	F　値	t　値	P　値	単相関	偏相関
頭Z	-1.020334	0.212279	-1.44182	-0.59885	23.10303	-4.80656	5.81E-06	-0.39539	-0.44417
背中Y	1.1607487	0.080283	1.001345	1.320153	209.039	14.45818	1.26E-25	0.991471	0.830547
右肘XX	0.0468685	0.012608	0.021835	0.071902	13.81879	3.717363	0.000342	-0.21364	0.358004
右肘YY	-0.216454	0.080442	-0.37617	-0.05673	7.240404	-2.6908	0.008437	0.98297	-0.26743
左肘Z	0.3711497	0.172236	0.02917	0.713129	4.643531	2.154885	0.033726	-0.3643	0.216965
定数項	109.07662	19.11862	71.11615	147.0371	32.54995	5.705256	1.34E-07		

頭の z 座標を Hz，背中の y 座標を By，右肘の x 軸周りの回転角を RExx，右肘の y 軸周りの回転角を REyy，左肘の z 座標を LEz とすると

$$\mathrm{RANy} = (-1.0203) * \mathrm{Hz} + 1.1607 * \mathrm{By} + 0.0469 * \mathrm{RExx}$$
$$+(-0.2165) * \mathrm{REyy} + 0.3711 * \mathrm{LEz} + 109.0766 \tag{25}$$

表 7. 右足首の z 座標に関する重回帰

変　数	偏回帰係数	標準誤差	下限値	上限値	F　値	t　値	P　値	単相関	偏相関
腰Z	0.857292	0.035457	0.786929	0.927655	584.5986	24.17847	4.31E-43	0.925436	0.925436
定数項	-88.54268	4.119636	-96.718	-80.3674	461.9422	-21.4928	7.2E-39		

腰の z 座標を Wz とすると

$$\mathrm{RANz} = 0.8573 * \mathrm{Wz} - 88.5427 \tag{26}$$

表 8. 左足首の x 座標に関する重回帰

変　数	偏回帰係数	標準誤差	下限値	上限値	F　値	t　値	P　値	単相関	偏相関
背中X	0.9913776	0.010752	0.970034	1.012721	8500.801	92.19979	1.63E-95	0.993894	0.994401
右手首Z	-0.176931	0.0746	-0.32501	-0.02885	5.625062	-2.37172	0.019701	-0.18224	-0.23527
左手首Z	0.259025	0.077457	0.105274	0.412776	11.18309	3.344113	0.001178	-0.19733	0.323011
定数項	-23.08242	4.216821	-31.4527	-14.7121	29.96348	-5.47389	3.51E-07		

背中の x 座標を Bx，右手首の z 座標を RWRz，左手首の z 座標を LWRz とすると

$$\mathrm{LANx} = 0.9914 * \mathrm{Bx} + (-0.1769) * \mathrm{RWRz} + 0.259 * \mathrm{LWRz} - 23.0824 \tag{27}$$

表 9. 左足首の y 座標に関する重回帰

変　数	偏回帰係数	標準誤差	下限値	上限値	F　値	t　値	P　値	単相関	偏相関
頭X	0.2504424	0.095059	0.0617	0.439184	6.94111	2.634599	0.009852	-0.21055	0.262229
背中Y	0.9866665	0.013051	0.960753	1.01258	5715.36	75.6	5.5E-86	0.991172	0.991877
右肩Z	-0.661587	0.132577	-0.92482	-0.39835	24.90206	-4.9902	2.76E-06	-0.32878	-0.45764
右手首X	-0.198981	0.0932	-0.38403	-0.01393	4.558228	-2.135	0.035361	-0.24404	-0.21506
左手首XX	0.0809101	0.031052	0.019255	0.142565	6.789282	2.605625	0.010662	0.044271	0.25954
定数項	100.58018	18.78401	63.2841	137.8763	28.67137	5.354565	6.06E-07		

頭の x 座標を Hx，右肩の z 座標を RSz，右手首の x 座標を RWRx，左手首の x 軸周りの回転角を LWRxx とすると

$$\mathrm{LANy} = 0.2504 * \mathrm{Hx} + 0.9867 * \mathrm{By} + (-0.6616) * \mathrm{RSz}$$
$$+(-0.199) * \mathrm{RWRx} + 0.0809 * \mathrm{LWRxx} + 100.5802 \tag{28}$$

表 10. 左足首の z 座標に関する重回帰

変　数	偏回帰係数	標準誤差	下限値	上限値	F　値	t　値	P　値	単相関	偏相関
背中Z	0.855883	0.033527	0.789341	0.922425	651.6837	25.5281	7.8E-45	0.927521	0.932973
右手首X	0.0069465	0.002512	0.001961	0.011932	7.647808	2.765467	0.006805	0.022484	0.270336
定数項	-88.4011	3.902425	-96.1463	-80.6559	513.1522	-22.6529	1.62E-40		

背中の z 座標を Bz とすると

$$\mathrm{LANz} = 0.8559\mathrm{Bz} + 0.0069 * \mathrm{RWRx} - 88.4011 \tag{29}$$

5.3　補正式による位置推定結果

上記で算出された補正式をもとに，模擬作業により取得した 100 シーンの姿勢の足首座標を算出し，その値をもとに再度下肢コードおよび AC コードを判定する．

以下の表 11 に，補正前と補正後の下肢コードの外れ値に関する割合を示す．

表 11．補正前と補正後の下肢姿勢コード割合

（補正前）

一致	不一致			
	外れ値	±1	±2	±3
63	15	13	5	4

（補正後）

一致	不一致			
	外れ値	±1	±2	±3
72	0	20	4	4

補正前と補正後の外れ値の数を比較すると，補正後は外れ値が発生しないことが示された．

また，以下の図に下肢コード全体の産業医の判定値との一致率の比較を示す．

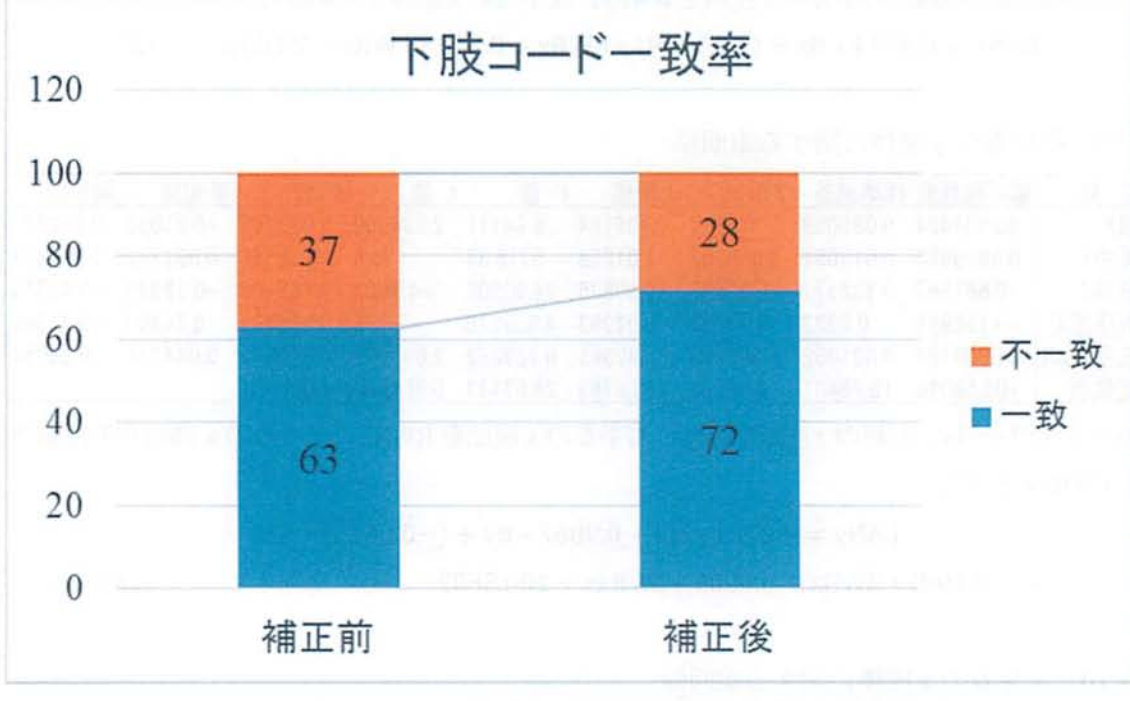


図 47．補正前と補正後の下肢コード一致率比較

補正前と補正後の下肢コードの，産業医の一致率を比較すると，一致率は 9%改善し，72%となった．

本手法の適用によって算出された下肢姿勢コード，および各姿勢コードをもとに 100 シーン全体の AC コードを判定した．

本手法で判定した AC コードと，産業医によって判定された AC コードを比較した結果を以下の図 48 に示す．

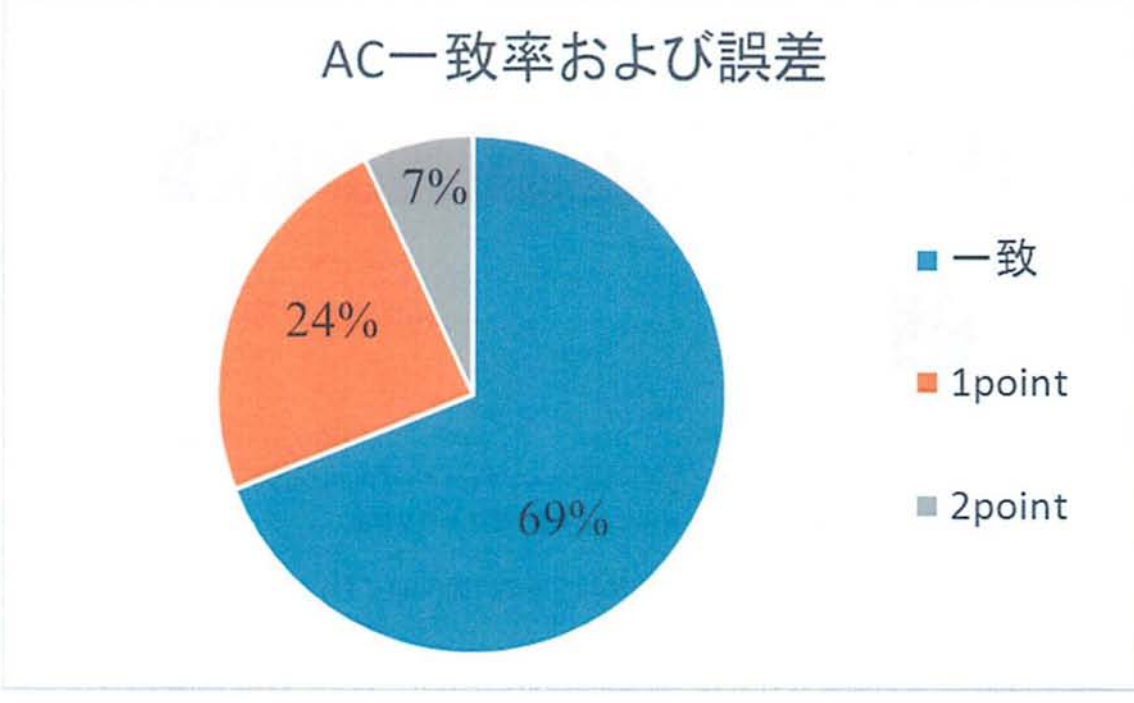


図 48. 本手法による AC コード一致率と誤差割合

本手法を適用した AC コード判定値と，産業医による判定値との一致率は，69%となった．AC コードのズレの内訳(ズレの値)は，1 ポイントが 24%，2 ポイントが 7%，補正前に 13%あった 3 ポイント以上のズレは発生しなかった．

5.4　要作業姿勢判定時間の比較

次に，先行研究と本手法の作業姿勢評価にかかる時間を比較する．

荷役作業 100 シーンに対し，先行研究(マウスポイント手法)，本手法それぞれにおいて座標取得から作業姿勢評価までを行い，その所要時間を計測した．

以下の図 49 に，所要時間の内訳を示す．



図 49.　作業姿勢判定所要時間(単位：秒)

総所要時間は，先行研究が 3126 秒，本手法が 450 秒となり，およそ 85%の削減となった．先行研究においてはモーションキャプチャにマウスポイント手法を用いていたが，本手法においては Kinect を用いることによって，モーションキャプチャにかかる時間が大幅に減少している．

時間短縮の要因としては，先行研究においては実動画の静止画 1 シーン(30f/s)につき，50 以上もの点を目視でポイントしなくてはならないため，モーションキャプチャに多分に時間がとられてしまうことが挙げられる．提案手法では，Kinect により一連の作業を撮影することによって座標を連続(30f/s)で取得していくので，先行研究よりモーションキャプチャにかかる時間の割合が少ない．また，目視によるマウスポイントを行う必要がある先行研究と比較すると，モーションキャプチャに関する人為的ミス，また使用者の負担も減少すると考えられる．

時間を短縮するには，VR による作業再現および確認の時間を削減することが必要であるが，これには作業者の各座標取得精度向上が不可欠であり，今後の本研究の課題である．

6. 結言

本研究では，使用者にとってより簡便で所要時間のかからない装置を開発することを目的に，Kinect for Windows を用いた作業姿勢判定手法を提案し，本装置に実装した．

本装置を用いて荷役作業の模擬作業の作業姿勢評価をおこなった．作業姿勢判定にかかる所要時間は先行研究に比べ改善が見られた．

姿勢評価において，産業医の姿勢評価値との差異がみられ，その要因を検討し，差異の改善を行った．

今後の課題としては，外れ値以外の下肢姿勢コードの一致率の改善，および背部姿勢コードの一致率改善が挙げられる．

参考文献

[1]瀬尾明彦：人間工学と産業保健のホームページ
http://homepage2.nifty.com/aseo/index.html（2013 年 12 月 28 日アクセス ）

[2] 奥田　誠司，三浦　一記，Proposal of Workload evaluation Method in Wearing Work Assisting Tool for Work Posture Design System”，日本経営工学会論文誌

[3] Carey E.J and Gallwey T.J. : “Evaluation of human post+ures with computer aids and virtual work place designs”, International Journal of Production Reseach, 37 - 11, pp.3941 - 3957 (2002)

[4] 霧野啓子：“組立工程設計支援方法およびその装置”，公開特許広報(4)，特願平 7 - 163296

[5] 常定和也：“実・仮想空間での作業モデルの構築に関する研究”，岡山大学大学院自然科学研究科，平成 18 年度博士論文 (2006)

[6] 伊津見一彦，門脇正典，梶原康博[他]，滝聖子，瀬尾明彦(Theory and Methodology)：“作業姿勢計画支援装置に関する研究 (理論・技術)”，日本経営工学会論文誌，Vol63, No4, pp.236-244 (2013)

[7] Karhu, O., Kansi, P., and Kuorinka, I.,: “Correcting working postures in industry: A practical method for analysis”, Aplied Ergonomics, Vol.8, No.4, pp.199-201 (1977)

[8] McAtmney, L., Corlett, N.,: “RULA; A Survey Method for the Investigaion ofWork-Related Upper Limb Disorders” ,Applied Ergonomics, Vol.24, No.2, pp.91-99 (1993)

[9] 長町三生:“Participatory Ergonomics による作業改善の研究”，日本経営工学会論文誌，Vol.53, No.5, pp.410-417 (2002)

[10] Santos, J., Sarriegi, J., Serrano, N., Torres, J.,: “Using ergonomic software in non-repetitive manufacturing processes: A case study ” ,International Jounal of Industrial Ergonomics, Vol.37, pp.267-275 (2007)

[11] 藤澤一暁，松原行宏，岩根典之，真嶋由貴恵：“作業姿勢分析における関節角度に基づくファジィ推論を用いた姿勢自動分類手法 ”，バイオメディカル・ファジィ・装置学会誌, Vol.10, No.1, pp.126-129 (2008)

[12] Swat, K., Krzychowicz, G.,: “ ERGONOM: Computer-aided working posture analysyis system for workplace designers” ,International Jounal of Industrial Ergonomics, Vol.18, pp.1526 (1996)

[13] Rim, Y. H., Moon, J. H., Kim, G. Y., NOH, S. D.,: “Ergonomic and biomechnical analysis of automotive general assembly using XML and digital human models” ,International Jounal of Automotive Technology, Vol.9, No.6, pp.719-728 (2008)

[14] Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. : Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In

Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry, pp. 1–18. American Society of Photogrammetry, Falls Church, 1971.

[15] G.T. Marzan and H.M. Karara. : A computer program for direct linear transformation solution of the colinearity, and some application of it. Proceedings of the Symposium ib Close-Range Photogrammetric Systems, pp. 420–476, 1975.

謝　辞

本研究を行うにあたり，ご指導及び有益な助言を頂きました梶原康博教授に深く感謝の意を表します.
同時に研究にあたり多大なご協力を頂きました株式会社山九 江口正修様，伊津見一彦様に深謝いたします.
　また，本論文を作成する上で有益な助言を頂きました審査委員の山本久志教授，
瀬尾明彦教授に深く感謝申し上げます.
最後に，共同で研究にあたった今井氏をはじめとして，本研究を遂行する上で多大なご助力を頂きました研究室の諸兄に深く感謝いたします.

平成 28 年 1 月
奥田 誠司