

Kinect™ を使用した動作計測における キャリブレーション法の開発と歩行パラメータ計測への応用

足立和隆*・石本明生**・本多信夫**・本田実加***

Development of Calibration Method for Motion Analysing System using Kinect™ and its Application to Measure Walking Parameters

ADACHI Kazutaka*, ISHIMOTO Akio**, HONDA Nobuo** and HONDA Mika***

Abstract

We developed a system for motion analysis which is easy to operate and low-cost. This system is composed by a personal computer (OS: Windows, CPU: Core i5 or higher specification) and three Microsoft Kinect™ cameras. Calibration of the system is also easy and unique. For calibration only a sphere of 20cm in diameter (Styrofoam) should be moved vertically in the measuring area. The three Kinect™ cameras trace and measure this sphere continuously. They recognize this sphere as a circle of 20cm in diameter and measure the distance between each camera and the sphere, then determine variables necessary for motion measuring. After this calibration a size-qualified wooden block (dimension: 30 × 10 × 20cm) was placed at 15 points in the measuring area and its dimension was measured by this system. The accuracy of measuring was good with only less than 1% error by taking an average.

For an application of this system we measured walking parameters which are walking speed, stride length and cadence. Walking speed is a product of stride length and cadence, therefore from two parameters of them the rest parameter will be able to calculate. We measured walking speed and stride length with this system. To test precision of this system for measuring walking parameters we took the same walking scene with a video camera and measure walking parameters from the recorded pictures, too. By a comparison of the walking parameter data from these different methods, the Kinect™ system is highly accurate for measuring walking parameters and we conclude that it is enough for practical use.

Key words: Kinect, Motion Analysis, Calibration, Walking parameters

1. はじめに

1.1 近代的な動作計測法の変遷

ヒトの動作計測は、スポーツにおける技術分析、パフォーマンス向上を目的として行われるだけでなく、人間工学や人類学といった学問分野においては、動作の分類や、動作の特徴を明らかにするため、日常生活におけるあらゆる動作を対象として行われ

てきた。

近代的な動作計測法の歴史は、Braune と Fischer²⁾ のヒトの歩行に関する計測から始まる。彼らは、人体の体節に平行して上下肢及び頭部、体幹に光電管を取り付け、暗室の中でこれを点滅させながら歩く様子をスチルカメラのシャッターを開放にして多重露光させることによって、歩行動作を記録し、関節

* 筑波大学体育系
Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

** (株) HAL デザイン研究所
HAL Design Institute Co., Ltd.

*** 日本大学松戸歯学部・歯科基礎医学系
Nihon University, School of Dentistry of Matsudo

角度の変位などの各種計測を行った。Weber と Weber¹⁰⁾ は、望遠鏡によって歩行運動を記録し、地面から足への荷重と共に分析を行った。Muybridge^{3,4)} は、1870年代、モーションカメラ（ムービーカメラ）の発明以前に、スチルカメラを歩行路に沿って複数台並べ、シャッターを短い間隔で順番に切ることによって、一連の動作を一定間隔の静止画として撮影した。Marey^{6,7)} は、動作計測用の様々な機器を開発した。とくに歩調に関しては、靴底に組み込んだ空気室から着地の度に押し出される空気をチューブを介してクロノグラフにつなぎ、初めての記録を行った。モーションカメラの発明後は、フィルム上に撮影されたそれぞれのコマの画像から、人体各部の変位を計測することによる動作解析が一般的となった。ビデオカメラが発明されると、高価なフィルムを使う必要がなくなり、費用が格段に安くなるという理由から、超高速撮影を除いては、ビデオカメラを使用した動作計測法がフィルム撮影による動作計測法に取って代わられた。

ビデオカメラによる撮影も、かつてはビデオテープに記録する方法が主流であったが、現在はメモリー素子への記録が一般的となった。ビデオカメラに記録された画像は、コンピュータを使用して分析する場合、画像を一旦、メモリー素子に取り込むための装置とその取り込み操作が必要である。しかし、メモリーに記録された画像であれば、一般的にはそのまま、あるいは簡単な前処理を行うだけでコンピュータによる分析が可能であり、撮影後の労力が格段に省力化された。

上記の方法は、撮影した画像中の対象物の特徴点を時間ごとに追跡していく方法による動作計測法であるが、対象物のマーカの変位のみを電氣的に直接、計測することによる動作計測システムも開発された。これには、超音波を発するマーカを使用し、複数のマイクロフォンによる三角測量でマーカの三次元的な位置を求めるもの、赤外線発光素子のマーカを特殊な受光素子をもつ複数カメラで撮影し、受光素子中の赤外線マーカが投影された位置から空間内の赤外線マーカの三次元位置を算出するもの、磁場を発生させ、磁場が発生源から徐々に弱くなることを利用して、磁場の強度から三次元的な位置を割り出すもの、また、ビデオカメラと同じ原理の複数のカメラを使用し、カメラ側から赤外線を照射し、マーカには赤外線反射素材の球を使用して、各カメラの撮像素子に投影された反射マーカの位置から、三次元的にマーカの位置を算出するといったものがある。取り扱いの簡便さ、精度、マーカに電氣的な配線が必要ないという理由か

ら、今日では、後者の赤外線反射マーカを使用した三次元動作計測システムが主流となっている（商品名：VICON など）。ただし、このシステムはかなり高価であり、一般に普及している数が限られている。また、身体各所に赤外線反射マーカを貼り付けるためには、解剖学的知識と経験が必要であり、さらにマーカ自体を貼り付ける手間が必要である。貼り付けるマーカも体表面であるため、体内の骨格や関節位置は、数点のマーカから計算によって求める必要がある。

どのような動作計測システムにおいても、各マーカあるいは身体の体節の正確な位置を算出するために、キャリブレーション（校正）が必要である。これは、あらかじめ3次元にお互いの距離が既知のマーカ位置を装置に読み込ませ、システムプログラム中の計算の係数を求める作業である。一般的に複数のカメラを使用した3次元動作計測で実施されるキャリブレーションにおいては、計測エリア内に、基準点間の距離がわかり、方向が固定された基準点を複数個置き、さらに基準点が数点固定された棒状のものを計測エリア内で振り回すことを行う。本研究では、このキャリブレーション作業よりも簡単なキャリブレーション法を考案した。

1.2 本システムの特徴

本システムには、KinectTM という、本来はテレビゲーム機用の動作入力装置を使用している。本システムの利点は、マーカを貼らずに動作計測が行えるということ、キャリブレーション法が簡単、容易であるということ、複数の被験者に対して流れ作業的に連続して動作計測が行えること、そしてシステム自体が安価であるという点である。このキャリブレーション法は、今回、このシステムのために新たに開発したものである。一方、欠点として、歩行や一般的な日常動作の計測に対して、本システムはそのまま使用できるが、特殊な動作に対応させるためには、装置のコンピュータで使用しているプログラムをそれに応じて書き換える必要がある。また、KinectTM は民生機器で、そのサンプリングレートが30回/秒以上に上げられないため、速い動作には使用できない。



図1 KinectTM 外観。3つの丸い穴は、向かって左から赤外線パターン投影機、カラービデオカメラ、赤外線パターン撮影カメラである。

1.3 Kinect™とは

Kinect™は、Microsoft社が製造、販売しているテレビゲーム機Xbox360用に同社から発売されている非接触型動作入力装置である(図1)。Kinect™1台の単価は、2万円程度である。この装置には、被写体までの距離を測定する装置、通常のカラビデオカメラ、マイクロフォンアレイ、3軸加速度計、電動チルト機構が内蔵されている。被写体までの距離を測定する装置は、赤外線パターンの投影機と、それを撮影する赤外線カメラから構成されており、これらが左右に75mm離れて設置されている。赤外線パターンの投影機からは、一定のパターンをもったスポットが被写体に向けて照射されるが、このパターンはKinect™に内蔵された記憶素子に記録されており、これと赤外線カメラが撮影した被写体上でのスポット分布のずれ(記憶素子上のスポット間隔と被写体に投影されたスポット間隔の差)を、三角測量の原理を利用して計算し、カメラから被写体までの距離を測定する。なお、このパターンはKinect™ごとに異なっており、Kinect™を複数台同時に使用しても、それぞれのKinect™は、自分の照射したパターンを弁別し、独自に被写体までの距離を算出する。Kinect™は、USBインターフェースによって、Windowsをオペレーティング・システムとしたパーソナルコンピュータに接続し、公開されている基本的なソフトウェア^{8),9)}によって、被写体のカラー画像の撮影とともに、被写体の各部分までの距離を1秒間に30回のサンプリング周波数で測定、記録することができる。本研究で開発したシステムでは、精度を上げるためと死角をなるべく生じさせないためにKinect™を3台使用し、被写体を異なる方向から撮影した。また、USBインターフェース用の素子は、一度に3台のUSB機器を接続できるようになっているが、Kinect™3台からのデータを同時に処理するためには、それぞれに専用のUSBインターフェース素子が必要である。さらに、これらのデータ処理はCPUに大きな負荷を与えるため、コア数の多い高速なCPU(具体的にはIntel社製Core i5, i7以上の性能)をもつパーソナルコンピュータを必要とする。3台のKinect™を操作し、さらに歩行パラメータを自動的に計測するためのソフトウェアは、本研究において独自に開発したものである。

1.4 歩行パラメータ

歩行パラメータは、歩行速度、歩幅(ストライド長)、歩調(ケイデンス)のことであり、歩行速度は歩幅と歩調の積であるので、これらのうち2つが

分かれば、残りの1つは計算によって求めることができる。これらの歩行パラメータは、人類学的な興味の対象として研究されたり¹⁾、日常生活における基礎データ、たとえばある距離を歩行時間で示すような場合(横断歩道における歩行者用信号が「青」である時間)の基準、さらに加齢あるいはリハビリテーションにおける運動機能の変化をみるための指標としても用いられる。

歩行パラメータの計測法としては、計測現場においてリアルタイムで計測を行う場合、簡便さの観点から、歩行速度と歩調を計測し、計算によって歩幅を求めるのが一般的である。歩行速度の計測は、一定の距離を通過する時間からその間の平均速度を算出する。時間の計測には、ストップウォッチ、あるいは光電管を使用する。歩調に関しては、歩行速度を計測している同じ試技に対して、他の検者が、規定のステップ数(たとえば10ステップ)に要する時間をストップウォッチで計測することによって求める。計測現場におけるリアルタイムの計測が難しい場合、歩行試技をビデオ等で撮影し、後に撮影画像に対して歩行パラメータの計測を行うこともできる。画面上の一定距離を通過した時間を、撮影画像のコマ送りによって求めることによって歩行速度が算出できる。さらに画面上では歩幅あるいは歩調の計測が可能である。しかし、歩調の計測に必要な踵接地の瞬間を撮影画像から見きわめることが難しい場合が多く、精度の点からは歩幅を計測し、歩行速度を歩幅で除して歩調を求めた方がよい。

2. 被験者及び方法

2.1 被験者

被験者は健常な成人男性3名である。

2.2 方法

歩行パラメータの計測に先立ち、本計測システムの設置とキャリブレーション、検定用ブロックによる精度検定を行った。

2.2.1 歩行パラメータ計測環境

実験は、縦12m、横7mの室内(フローリング床材)で実施した(図2)。実験室の長手方向の床中央に巻き尺(10m)を貼り付け、被験者には、巻き尺に沿ってこの距離を歩行させた。歩行路の中央部、約2mの長さにあたり、歩行速度と歩幅の計測を行った。Kinect™は、この範囲の計測が十分行えるように、歩行路を歩く被験者の正面および左右の位置の計3箇所に配置した。また、Kinect™の精度検定のために歩行速度、歩幅を別途求めるためのビデオカメラも被験者の左側に配置した。実験に先立ち、歩



図2 実験を実施した部屋。被験者は、中央に見える巻き尺の左側を向こう向きに歩く。Kinect™は、歩行路正面と歩行路の左右にそれぞれ1台の計3台設置し、左手には歩行パラメータ計測用のビデオカメラも設置した。歩行路中心には、キャリブレーション用白球が置かれている。システムをコントロールするパーソナルコンピュータは画面右奥に設置されている。

行路中央部の縦、横2m、高さ約1.5mのエリアにおいてキャリブレーション作業を行った。

2.2.2 キャリブレーション

本研究でキャリブレーションに使用される器具は、直径が既知の球体である。具体的には、直径が20cmの発泡スチロール製の白い球体である(図3)。キャリブレーションを行ったのは、歩行速度と歩幅を計測する歩行路中央部の縦、横2m、高さ約1.5mのエリアである。図4に示すように、この計測範囲の9ヶ所において、この球を単に上下に移動させるだけでキャリブレーションが完了する。この球を上下させる動作は、厳密でなくてよい。すなわち、軌跡も正確に直線でなくて良く、高さも任意で良い。このキャリブレーション作業中、システムはこの球の計測をし続け、後の動作計測に必要な係数の値を自動的に求める。キャリブレーションに球体を使用したのは、球体はどの方向から撮影されても「円」として撮像されるからである。球すなわち「円」の直径は20cmであるので、これによってカメラと被写体間の距離が容易かつ精密に求まる。Kinect™自体でもKinect™と被写体間の距離を算出できるが、このキャリブレーションによって、さらに精度が向上する。なお、このキャリブレーション法は、特許として申請済みである³⁾。

2.2.3 検定用ブロックの寸法による精度検定実験

球体によるキャリブレーション法の妥当性と精度検定は、縦100mm、横300mm、高さ200mmの検定用ブロック(図5)を使用して行った。この検定用ブロックを歩行パラメータ計測エリアの各所(床



図3 キャリブレーション用発泡スチロール製白球(三脚上に取り付けてある)。

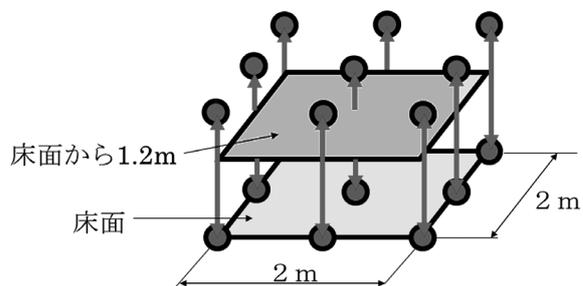


図4 計測範囲とキャリブレーション用白球を移動させる位置(9ヶ所)。キャリブレーションの後、床面レベルと床面から1.2mのレベルに検定用ブロックを置き、Kinect™によってこのブロックの3辺の長さを測定し、実測値と比較する。

面レベルおよび床面から1.2mの高さレベルにおいてそれぞれ15ヶ所に置き、それら各位置において3台のKinect™からのデータをもとに各辺の長さの測定を行った。

2.2.4 ビデオカメラの設置とキャリブレーション

Kinect™の精度検定のため、正確とみなせる別の方法で歩行パラメータを求める必要がある。この方法として、ビデオカメラによる計測法を採用した。これに使用するビデオカメラのキャリブレーションは、歩行路に80cmの長さの棒を置き、それを撮影することによって、画面中の物体の寸法を求められるようにした(図6)。

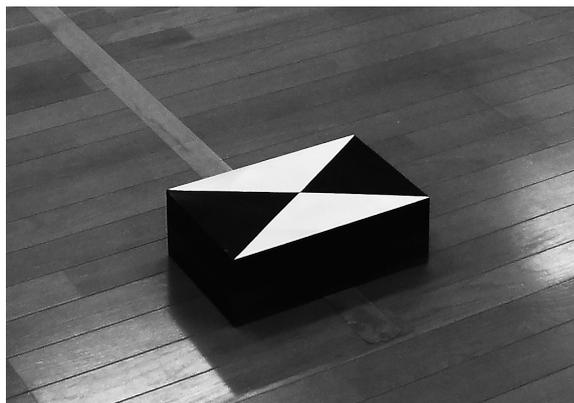


図5 検定用ブロック（縦100mm、横300mm、高さ200mm）。特定のパターン（ここでは最も広い面に白黒の模様）を描けば、Kinect™は自動的にこのブロックを見つけ出し、寸法の測定が行われるようにした。なお、計測時には100mm×300mmの面が下となるようにして、パターンを描いた面が垂直になるようにした。



図6 ビデオカメラのキャリブレーション（80cmの棒を2本使用する）。棒を床面に寝かせた状態での撮影も行う。

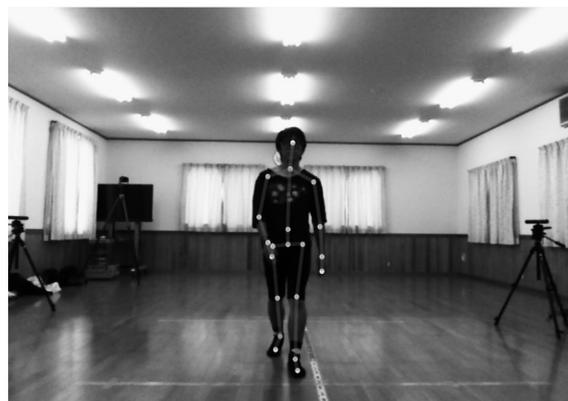
2.2.5 歩行実験

各被験者の服装は、普段着である。本計測システムでは、Kinect™を3台使用し、身体の輪郭をもとに骨格と関節位置を推定できるようにしてある。このアルゴリズムには、一般的な人体のプロポーシオンデータを組み込んであるので、極端な厚着、あるいは袖の大きい和装といった服装でない限り、骨格と関節位置の判定を高い精度で行うことができる。なお、女性のスカートに関して、極端なロングスカートでない限り、股関節と膝関節の位置は参照モデルとしている平均的なプロポーシオン体型から計算するようにしてある。各被験者には、裸足あるいはスニーカー（4種）を履いて通常速度における歩行（通常歩行）、速い速度における歩行（速歩）、遅い速度における歩行（遅歩）、裸足における高齢者を模した歩行（老人歩行）を計48試技を行わせ、

Kinect™による歩行速度、歩幅の計測およびビデオカメラ撮影による同じ試技の歩行速度、歩幅の計測を行った。両計測法における計測値を比較し、Kinect™による歩行パラメータの精度検定を行った。

2.2.6 人体判別アルゴリズム

歩行実験において、それぞれのKinect™は対象物までの距離を測定する機能を使用して、その撮影範囲内にヒトがいるかどうかということを確認する。これにはコンピュータソフト内にあるヒトの体型に関するデータを参照する。このデータにほぼ一致する対象物を「人体」として認識する。人体を認識後、ソフトウェアで設定したアルゴリズムに従って、身体の輪郭から身体内部の骨格と関節位置をリアルタイムで算出する。その計算結果を、実験中の画面にスティックピクチャーとしてスーパーインポーズさせるようにした（図7a,b）。



a



b

図7 実験中、モニター画面に表示された被験者と計算によってスーパーインポーズされた骨格と関節を示すスティックピクチャー。3台のKinect™を使用しているので、たとえば、左右の股関節も分離して認識している。

2.2.7 歩幅計測アルゴリズム

歩幅（ストライド長）の計測は、足として認識されている対象物が、計測エリア内で3サンプリング

中（1/10 秒間）に歩行進行方向において 20mm 以上移動しなかった場合、足がその位置に接地していると判断し（立脚期）、その位置情報を記録する。その足が移動を開始し（遊脚期）、再度、3 サンプルリング中に 20mm 以上移動しなかった場合、次の立脚期と判断し、先に記録した立脚期の足の位置をこの位置から引くことによって歩幅（ストライド長）を求めた。

3. 結果

3.1 検定用ブロックの寸法による精度検定実験

計測範囲空間の床面のレベル、そして床面から 1.2m の高さレベルのそれぞれ 15ヶ所において Kinect™ で測定した検定用ブロックの各辺の長さが、ブロックの実際の長さに対してどの程度の誤差 (E) をもつかということによって求めた。

$$E = (|K_1 - R_1|/R_1 + |K_2 - R_2|/R_2 + |K_3 - R_3|/R_3) / 3$$

Kn : Kinect™ で測定した各場所における各辺の長さ

Rn : 各辺の実測値

n=1 : 100mm の辺、n=2 : 300mm の辺

n=3 : 200mm の辺

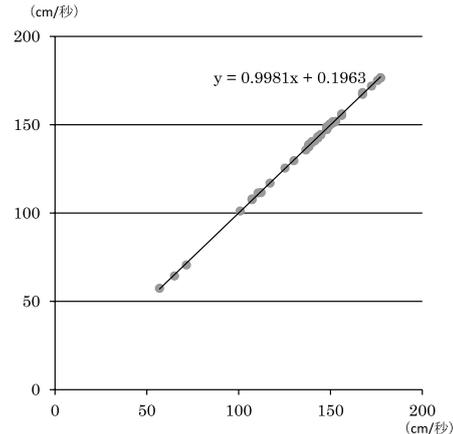
この式によって求めた各測定場所における 3 辺の誤差平均に関して、床面レベルおよび床面から 1.2m の高さレベルにおける誤差平均と標準偏差を % 表示で表 1 に示す。

3.2 歩行パラメータの計測

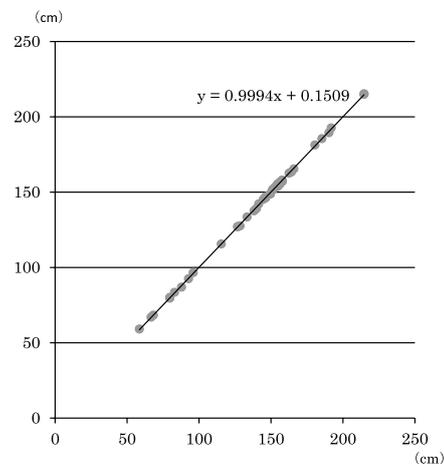
3 名の被験者における様々な歩行 48 試技について、Kinect™ とビデオカメラによって測定した歩行パラメータを図 8 に示す。いずれも同一試技に関して、x 座標がビデオカメラによって計測した値、y 座標が Kinect™ によって計測した値となるようにプロットした。図 8a は、歩行速度、図 8b はストライド長、図 8c は、各試技において、歩行速度とストライド長から計算した 1 秒間におけるストライドの割合。すなわち、1 ストライドに要する時間の逆数で歩調の逆数でもある。各グラフ中には、回帰直線とその式を記した。

表 1 床面レベルおよび床面から 1.2m の高さレベルに置いた検定用ブロックの各辺の長さを Kinect™ によって測定した値と実測値の差の絶対値を実測値で除して求めた誤差 E の平均、標準偏差、最大値、最小値。（% 表示）

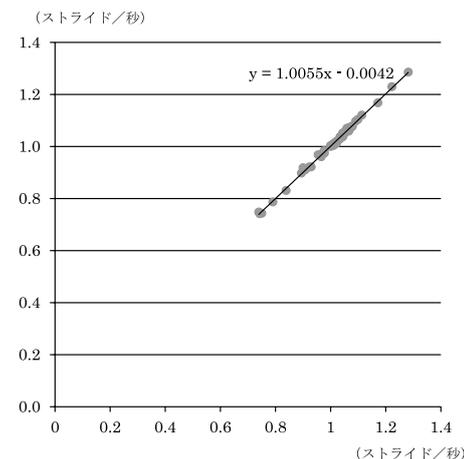
レベル	床面	床面から 1.2m	全体
平均	0.91	0.96	0.94
標準偏差	0.66	0.78	0.72
最大値	2.20	3.70	3.70
最小値	0.00	0.10	0.00



a



b



c

図 8 8a,b,c. Kinect™ とビデオカメラによって測定した 48 試技の歩行パラメータ。a : 歩行速度、b : ストライド長、c : 各試技において、歩行速度とストライド長から計算した 1 秒間におけるストライドの割合。すなわち、1 ストライドに要する時間の逆数。いずれも同一試技に関して、x 座標がビデオカメラによる計測値、y 座標が Kinect™ による計測値となるようプロットしたグラフ。各グラフ中には、回帰直線とその式を記した。

3.3 歩行パラメータの精度

Kinect™によって計測した値をビデオカメラによって計測した値をもとに以下の式により精度検定を行った。

$$Ew = |Km - Vm| / Vm$$

Ew ：誤差の割合

Km ：Kinect™によって計測した値

Vm ：ビデオカメラによって計測した値

結果を表2に示す。

表2 Kinect™によって計測した歩行パラメータ値の精度検定

歩行パラメータ計測値	誤差の割合 (Ew)
歩行速度	0.00371
ストライド長	0.00373
歩調	0.00490

3.4 相関係数

Kinect™によって計測した歩行パラメータ値とビデオカメラによって計測した歩行パラメータ値の相関係数を表3に示す。

表3 Kinect™によって計測した歩行パラメータ値とビデオカメラによって計測した歩行パラメータ値の相関係数

歩行パラメータ計測値	相関係数
歩行速度	0.999878
ストライド長	0.999789
歩調	0.998553

4. 考察

本研究の目的は、Kinect™を使用した廉価で簡便な動作計測システムの構築である。Kinect™は、民生機器であるために低廉である。しかし、Kinect™が開発されるまでは、このような装置は、研究目的にしか使用されない状況で、販売数も限られるためにその価格は数百万円以上となると考えられていた。本システムでは計測精度を高め、さらに対象物に対する死角をなるべく少なくするため Kinect™を3台使用した。本研究における第一の特徴は、キャリブレーション法にある。計測エリア内で球体を移動させるだけでキャリブレーションを行うことができる。これを行った時の本システムの計測精度は、

誤差の割合の平均値が1%未満であり、かなり高く、十分に実用に耐えるという結果となった。歩行パラメータの計測においても、相関係数は非常に高く、また回帰係数もほとんど1であり、本システムは十分に実用に耐える結果となった。

4.1 本システムの3次元計測に関するキャリブレーションと精度検定

本システムは、3次元におけるヒトの動作計測を行う装置であり、3次元空間内の対象物の座標値の測定を基本とする。これらは、1/30秒ごとに測定される。検定用ブロックによる精度検定では、ブロックの各頂点座標を測定し、そこから計算によって各辺の長さを求めている。したがって、各辺の長さの精度は、そのまま本システムの空間座標値測定の精度とみなしてよい。

検定用ブロックを置いた位置は、キャリブレーション用白球を上下に移動させた場所(9ヶ所)に加え、空間内で白球が通らなかった位置(6ヶ所)にも置いた。いずれの場所においても検定用ブロックの各辺の長さの測定値は実測値にかなり近く、キャリブレーションのために白球を上下に移動させた場所を本研究における9ヶ所から減らして精度検定を行い、検討してみる必要がある。

4.2 歩行パラメータの計測と検証

歩行動作は全身の運動なので、歩行パラメータは全身の運動機能の評価の良い指標となる。とくに高齢者の同一個人で継続的にその測定を行えば、運動機能低下の前兆や実態を知るための良い指標となる。運動教室あるいは病院、リハビリテーション施設において歩行パラメータの計測はあまり行われておらず、これは測定原理は簡単であるが、測定方法が多少面倒であるということに起因している。

本システムは、一般人でも簡便に操作できるように、とくに操作方法に関してはわかりやすさに主眼を置いて設計した。また、被験者に対しても「歩行スタート」のような号令をかけず、計測場所を単に通過してもらうだけで、歩行パラメータの計測が完了する。システムが被験者を自動的に認識し、また一度に2名の被験者が画面内にいてもそれぞれの歩行パラメータを計測できるので、被験者が流れ作業的に計測場所を通過するような状況でも、各人の歩行パラメータの計測が可能である。

このような付加的な機能がある本システムであるが、基本となる歩行パラメータの計測に関しても、本実験結果が示すように、相関係数と回帰直線の係数がいずれもほとんど1であり、精度の点では申し

分ない。

今後は、本システムをより多くの施設に普及できるような態勢を整え、さらに他の動作計測に対する発展、応用についても様々な可能性を視野に入れて取り組む予定である。

要 約

Kinect™を3台と制御用パーソナルコンピュータからなる動作計測システムを開発した。キャリブレーションには球体を使用し、これを計測エリア内数カ所で上下に移動させるだけの簡便な方法でも十分な精度が得られることが分かった。本システムを使用した歩行パラメータの計測においても、十分な精度が示され、本システムが実用化に十分耐えることが実証された。

文 献

- 1) 安倍希美 (1994) : ヒトにおける四足歩行とテンポに関する研究. 科学研究費課題番号 : 06780097.
- 2) Braune, W. und Fischer, O. (1835): *Der Gang des Menschen*. S.Hirzel, Leipzig.
- 3) 石本明生、本多信夫、足立和隆 (2012) : カメラのキャリブレーション方法及びカメラのキャリブレーション装置、特許、THP000001、特許分類 G01B 11/00.
- 4) Marey, E. J. (1878): *La Méthode Graphique dans les Sciences Expérimentales et Principalement en Physiologie et en Médecine*. G. Masson Editeur, Paris.
- 5) Marey, E. J. (1885): *La Méthode Graphique dans les Sciences Expérimentales et Principalement en Physiologie et en Médecine, Deuxième tirage augmenté d'un supplément sur le Développement de le Méthode Graphique*. G. Masson Editeur, Paris.
- 6) Muybridge, E. (1882): *The Attitudes of Animals in Motion, illustrated with the Zoopraxiscope*. Royal Institution of Great Britain.
- 7) Muybridge, E. (1955): *The Human Figure in Motion (Reprint)*, Dover Publications, New York.
- 8) 中村 薫 (2011) : KINECT センサープログラミング, 秀和システム.
- 9) 西林 孝、小野憲史 (2011) : キネクトハッカーズマニュアル, ラトルズ.
- 10) Weber, W. und Weber, E. (1836): *Mechanik der menschlichen Gehwerkzeuge*. Die Dieterichsche Buchhandlung, Göttingen.