

1007

# フィールドにおける3次元歩行動作解析システムの開発

柳 川 和 優

## Development of a walking movement analysis system of three dimensions that can be used in the field

Kazumasa YANAGAWA

### Abstract

The purpose of this study was to clarify the effectiveness and possible problems that may occur when using the walking movement analysis system of three dimensions in the field. Cinematography was performed using an optical signal with four sets of digital camcorders synchronously. First, in order to clarify measurement accuracy, the error of distance and angle in the actual value and calculation value, was examined. Next, the walking movements during free walking in the field using this system was analyzed employing ten young men, and the variables were compared with studies preceding this study. The following results were obtained:

1. It is more desirable to digitize using large projectors, such as a huge screen, when analyzing fine angles or distance of images of the whole body that is photographed.

2. It was thought that if the definition of each joint angle or the height of toe at heel contact is the same, the value of each variable acquired is similar to preceding studies. Therefore, it can be concluded that this walking movement analysis system of three dimensions is effective.

When analyzing images, it is necessary to raise measurement accuracy and to consider error factors irrespective of the field or laboratory.

## I. はじめに

一般に、歩行研究における動作解析は実験室で行うことが多い(Murray et al. 1964, 1969, Winter et al. 1983, 1990, Kaneko et al. 1991, Judge et al. 1995, 1996, 柳川ら 2002, 2003b)。それは、測定機材を外部に持ち出すことが難しい、暗幕等の設置を含めた実験設定を実験室外で行うことが困難である等の理由からである。したがって、歩行動作を測定するためには、被検者に実験室まで来ていただかなければならない。そこで、フィールドにおいて簡便に測定が可能な、3次元歩行動作解析システムの開発が望まれる。

フィールドに出向いての測定が可能になれば、簡単に実験室まで来ていただくことができない高齢者の測定が可能になってくる。このことには、体力の衰えた高齢者の測定ができる、一度に多くの被検者を測定することができる等のメリットがある。しかしその場合、実験室と同精度のデータが得られるかどうか問題となる。

そこで、本研究では、フィールドにおける3次元歩行動作解析システムの有効性と課題を明らかにすることを目的とした。

## II. 方法

### A. 被検者

被検者は、18～21歳の健常な若年者男子10名であった。被検者の身体的特徴は、年齢：19.4±1.2歳 (mean±SD, 以下同様), 身長：170.8±6.2 cm, 下肢長：79.7±6.5cm, 体重：64.1±6.7kg, であった。なお下肢長は、直立姿勢時の大転子から床面までの鉛直距離とした。

### B. 実験手順

撮影は、4台のデジタルビデオカメラ (Panasonic 製：NV-GS500) を光信号により同期させ、毎秒60フィールド、シャッター速度1/250秒で行った。撮影した映像をコンピュータに取り込み、動作解析システム (ToMoCo-VM, 東総システム製) により任意の標点をデジタイズした。

まず、測定精度を明らかにするために次のことを行った。測定空間となる一辺が1.8mの立方体内部に32個の任意の点を定めた。32個の任意の点は、次の4種類の6面体とした。箱小 (x:24cm, y:11.5cm, z:6.7cm), 箱中1 (x:30cm, y:15cm, z:39cm), 箱中2 (x:35.5cm, y:31.5cm, z:26cm), 箱大 (x:53cm, y:36.6cm, z:32.5cm) である。これらの点の x, y, z 座標は実測しておいた。動作解析システムにより、これらの点の x, y, z 座標を算出し、誤差 (算出値-実測値) を x, y, z 座標ごとに計算した。こうして得られたデータを用いて、任意の2点間の距離、任意の3点の成す角度を算出し、実測値との誤差を検討した (図1)。なお、距離は、x, y, z 共に、各4辺の平均値とした。標点のデジタイズは、約20インチモニター (縦30cm×横40cm) と約88インチ巨大スクリーン (縦134cm×横178cm) を用いて各4回ずつ行った。

次に、若年者男子10名を被検者とし、本システムを用いてフィールドにおいて撮影した歩行動作を分析した。被検者は、身体の27部位に反射マーカーを貼り付け練習歩行を数回行い、歩行に十分に慣れた後に裸足による

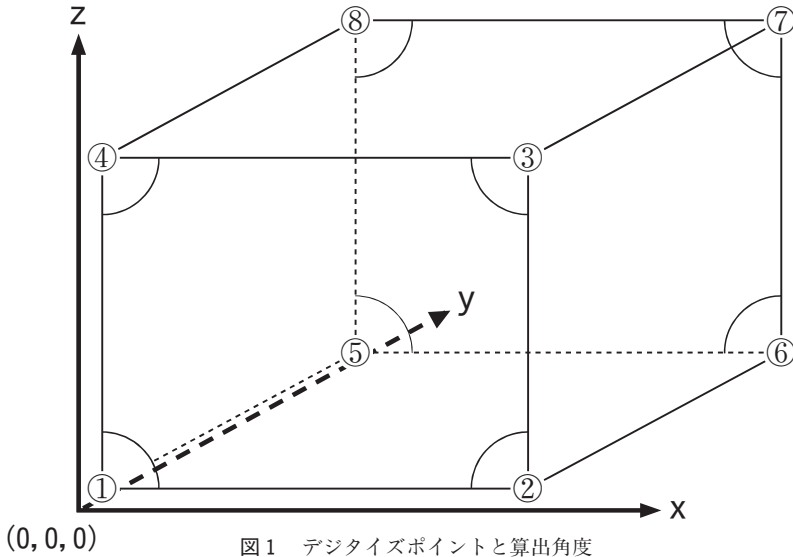


表1 測定精度の比較(距離)

箱	実測値 (cm)	20インチモニター 算出値(cm)	実測値 との差	巨大スクリーン 算出値(cm)	実測値 との差	
小	x	24.0	22.0(±1.27)	-2.0	22.5(±0.52)	-1.5
	y	11.5	8.0(±1.27)	-3.5	11.5(±0.52)	0.0
	z	6.7	6.0(±0.52)	-0.7	5.9(±0.25)	-0.8
			total   6.2		total   2.3	
中1	x	30.0	29.0(±0.73)	-1.0	27.8(±0.40)	-2.2
	y	15.0	10.0(±0.79)	-5.0	14.2(±0.54)	-0.8
	z	39.0	34.0(±0.95)	-5.0	33.6(±0.50)	-5.4
			total   11.0		total   8.4	
中2	x	35.5	35.0(±0.00)	-0.5	34.9(±0.34)	-0.6
	y	31.5	25.0(±1.07)	-6.5	31.0(±0.37)	-0.5
	z	26.0	26.0(±0.00)	0.0	24.4(±0.51)	-1.6
			total   7.0		total   2.7	
大	x	53.0	53.0(±0.00)	0.0	52.9(±0.44)	-0.1
	y	36.6	35.0(±0.76)	-1.6	36.9(±0.57)	+0.3
	z	32.5	30.0(±0.74)	-2.5	29.8(±0.40)	-2.7
			total   4.1		total   3.1	

算出値：デジタイズを4回行い算出した(各4直線の距離×4=16data)平均値  
mean(±SD)

自由歩行を1回行った。なお、被検者への速度の指示は、速くも遅くもない普通の速度で、とした。そして、動作解析システムにより歩行速度、ステップ長、歩調、両脚支持時間、踵着地時の爪先高、踵着地時と爪先離地時の各関節角度等を算出した。

### C. 統計処理

2群間の比較には、対応のないt検定を用いた。有意水準の判定は、危険率5%未満とした。統計解析は、StatView 5.0 for Macintosh (ヒューリンクス社) で行った。

## III. 結果

### A. 測定精度の検証

表1、表2の算出値は、20インチモニターと巨大スクリーンを用い、大きさの異なる4種類の6面体を各4回ずつデジタイズ(図1)して算出した結果である。

距離に関しては、箱小(ティッシュ箱)の3方向の辺の長さの実測値と算出値との差(絶対値)の合計値が、20インチモニターで6.2cm、巨大スクリーンで2.3cmと巨大スクリーンの方がデジタイズ誤差が小さかった。箱中1(ラック)、箱中2(段ボール箱)、箱大(折りたたみコンテナ)も同様に巨大スクリーンの方が距離におけるデジタイズ誤差が小さかった(表1)。

角度に関しては、箱小における8ヶ所の実測値と算出値との差(絶対値)の合計値が、20インチモニターで44.7°、巨大スクリーンで7°と巨大スクリーンの方がデジタイズ誤差が小さかった。箱中1、箱中2、箱大も同様に巨大スクリーンの方が角度におけるデジタイズ誤差が小さかった(表2)。

### B. フィールドで得られた若年者男子の歩容

本歩行動作解析システムの有効性を確認するために、フィールドにおい

表2 測定精度の比較(角度)

箱		20インチモニター		実測値 との差	巨大スクリーン		実測値 との差
		実測値 (deg)	算出値(deg)		算出値(deg)		
小	1	90.0	92.6(±1.53)	+2.6	91.2(±1.34)	+1.2	
	2	90.0	95.9(±1.37)	+5.9	88.6(±0.45)	-1.4	
	3	90.0	80.6(±1.43)	-9.4	92.3(±0.49)	+2.3	
	4	90.0	87.0(±1.68)	-3.0	88.9(±1.52)	-1.1	
	5	90.0	96.7(±1.16)	+6.7	90.3(±1.60)	+0.3	
	6	90.0	96.7(±0.86)	+6.7	89.6(±1.79)	-0.4	
	7	90.0	94.9(±0.98)	+4.9	90.1(±2.02)	+0.1	
	8	90.0	84.5(±1.30)	-5.5	89.8(±1.01)	-0.2	
			total   44.7			total   7.0	
中1	1	90.0	86.7(±1.09)	-3.3	90.4(±0.65)	+0.4	
	2	90.0	92.5(±0.67)	+2.5	89.9(±0.47)	-0.1	
	3	90.0	87.3(±1.15)	-2.7	91.1(±0.62)	+1.1	
	4	90.0	93.6(±1.06)	+3.6	88.8(±0.63)	-1.2	
	5	90.0	86.3(±1.02)	-3.7	90.9(±0.95)	+0.9	
	6	90.0	85.4(±0.58)	-4.6	88.8(±0.62)	-1.2	
	7	90.0	94.2(±1.16)	+4.2	90.2(±0.56)	+0.2	
	8	90.0	93.4(±0.84)	+3.4	90.7(±0.53)	+0.7	
			total   28.0			total   5.8	
中2	1	90.0	91.6(±0.74)	+1.6	90.3(±0.41)	+0.3	
	2	90.0	87.1(±0.62)	-2.9	90.1(±0.87)	+0.1	
	3	90.0	91.3(±1.06)	+1.3	90.2(±0.73)	+0.2	
	4	90.0	89.9(±0.78)	-0.1	89.4(±0.38)	-0.6	
	5	90.0	88.8(±0.82)	-1.2	90.4(±0.44)	+0.4	
	6	90.0	90.2(±0.62)	+0.2	90.5(±0.37)	+0.5	
	7	90.0	85.5(±0.73)	-4.5	89.7(±0.63)	-0.3	
	8	90.0	95.2(±0.79)	+5.2	90.7(±0.81)	+0.7	
			total   17.0			total   3.1	
大	1	90.0	91.5(±0.85)	+1.5	90.2(±0.81)	+0.2	
	2	90.0	87.3(±0.96)	-2.7	89.5(±0.17)	-0.5	
	3	90.0	90.4(±0.67)	+0.4	90.3(±0.40)	+0.3	
	4	90.0	90.3(±0.72)	+0.3	90.5(±0.57)	+0.5	
	5	90.0	89.8(±0.88)	-0.2	89.3(±0.45)	-0.7	
	6	90.0	89.9(±0.99)	-0.1	89.4(±0.29)	-0.6	
	7	90.0	89.5(±1.04)	-0.5	90.1(±0.41)	+0.1	
	8	90.0	90.8(±0.90)	+0.8	90.9(±0.49)	+0.9	
			total   6.5			total   3.8	

算出値：デジタイズを4回行い算出した平均値

mean(±SD)

表3 自由歩行中における先行研究と本研究の変数の比較

変数	先行研究 (n=9)	本研究 (n=10)	有意水準
歩行速度(m/min)	75.6 (± 7.67)	86.5 (±13.60)	p<0.05
ステップ長(m)	0.68 (± 0.047)	0.67 (± 0.063)	NS
ステップ長/下肢長	0.79 (± 0.048)	0.84 (± 0.072)	NS
歩調(steps/min)	111.0 (± 6.07)	115.8 (±19.38)	NS
両脚支持時間(%GC)	23.9 (± 1.29)	24.6 (± 6.36)	NS
踵着地時の爪先高(cm)	8.5 (± 0.97)	6.1 (± 1.44)	p<0.01
踵着地時の爪先高/下肢長	0.098(± 0.011)	0.077(± 0.018)	p<0.01
体幹			
踵着地時の角度(deg)	93.1 (± 2.49)	86.7 (± 3.27)	p<0.01
爪先離地時の角度(deg)	86.7 (± 2.30)	92.7 (± 3.36)	p<0.01
動揺角度(deg)	6.4 (± 1.75)	6.0 (± 1.65)	NS
膝関節			
踵着地時の角度(deg)	175.7 (± 2.15)	162.1 (± 3.26)	p<0.01
爪先離地時の角度(deg)	139.9 (± 6.02)	130.8 (± 6.98)	p<0.01
角度変位(deg)	60.1 (± 6.68)	54.9 (±18.85)	NS
足関節			
踵着地時の角度(deg)	94.9 (± 1.23)	68.8 (± 6.19)	p<0.01
爪先離地時の角度(deg)	109.9 (± 5.48)	84.1 (±21.55)	p<0.01
角度変位(deg)	27.2 (± 6.41)	37.3 (±26.34)	NS

動揺角度：踵着地時の角度と爪先離地時の角度の差 mean(±SD)

角度変位：一歩行周期中における関節角度の最大値と最小値の差

て得られた若年者男子の歩容の解析を行った。表3は、自由歩行中における先行研究(柳川ら2002, 2003b)と本研究の歩行変数の比較を示したものである。

先行研究のデータは、次の実験設定により得られたものである。

被検者は、健康な若年者(21~24歳)男子9名。

カメラ1台による2次元画像解析により多くの変数を算出(膝関節と足関節に関する変数以外)。膝関節と足関節の角度は、ゴニオメータデータにより算出。

立位時の膝関節角度は、ほぼ180°、足関節角度はほぼ90°となり、立位時の値によりデータ補正している。

体幹の角度は、肩峰-大転子-水平面の成す角度とした。

一方、本研究のデータは、次の実験設定により得られたものである。

被検者は、健常な若年者（18～21歳）男子10名。

カメラ4台による3次元画像解析によりすべての変数を算出。膝関節と足関節の角度は、画像解析により算出。

膝関節の角度は、大転子－大腿骨外側上顆－外果の成す角度、足関節の角度は、大腿骨外側上顆－外果－第5中足骨頭の成す角度とし、立位時の値により関節角度の補正を行っていない。

体幹の角度は、第7頸椎－左右大転子の midpoint－水平面の成す角度とした。

先行研究に比較して、本研究の自由歩行速度は有意に速かった ( $p < 0.05$ )。さらに、両群間に有意差が認められた変数は、踵着地時の爪先高、踵着地時の爪先高/下肢長、踵着地時の角度(体幹、膝関節、足関節)、爪先離地時の角度(体幹、膝関節、足関節)であった。体幹の動揺角度、膝関節と足関節の角度変位に有意差は認められなかった。

#### IV. 考 察

本研究では、3次元歩行動作解析システムの測定精度を明らかにすること、実際にフィールドで撮影された歩行動作を解析しその妥当性を確認すること、の2点に主眼を置いた。

まず、本システムの測定精度を明らかにするために、種々の2点間の距離と3点の成す角度の解析を行った。表1、表2により、20インチモニターより巨大スクリーンを用いてデジタイズした方が、距離、角度ともにデジタイズ誤差が小さいことが明らかとなった。本研究では、一辺が1.8mの立方体を標尺とし、被検者の1歩行周期を解析に用いた。身体全体がほぼ入る標尺を用い、身体各部位のデジタイズを行った場合、細かな動作の解析には注意が必要である。すなわち、足関節角度等の小さな関節の角度変化や踵着地時の爪先高など数センチの距離を解析する場合、小さなモニターでデジタイズすると誤差が大きくなり、測定精度が落ちる可能性がある



ということである。例えば、足関節角度の算出を想定した場合、下腿よりも一回り小さい箱小( $x:24\text{cm}$ ,  $y:11.5\text{cm}$ ,  $z:6.7\text{cm}$ , 各  $x-z$  の角度 $90^\circ$ )の値が参考になる。足関節角度が $90^\circ$ と仮定した場合、誤差が20インチモニターで平均 $5.6^\circ$ 、巨大スクリーンで平均 $0.9^\circ$ であった(表2)。したがって、身体全体が撮影された映像から細かな角度や距離の解析を行う場合、巨大スクリーンなど大きなプロジェクターを使用してデジタイズを行った方が望ましいと考えられる。

また、デジタイズに使用するモニターの大きさのみならず、解析に用いるマウスの解像度、モニターの解像度、ビデオカードの解像度、カメラの解像度、実験中のカメラから被写体までの距離、等がデジタイズ誤差に影響を与える可能性がある。デジタイズ誤差のみならず、入力部、解析部の各構成要素の誤差要因に注意が必要である(安藤1988)。さらに、本動作解析システムは標点の自動読みとりに対応している。したがって、周囲にある反射マーカと似た色の物体を黒い布等で隠し、反射マーカに光を当てれば、20インチモニターを用いても精度の高いデジタイズが可能となる。これらのことは今後の課題であり、画像解析を行う場合には、フィールド、実験室にかかわらず測定精度を高めるための努力が必要である。

次に、フィールドにおける歩行動作解析において得られた値が、一般的に示されている値と同様の値であるかどうかの確認を行った。先行研究と比較して、本研究の自由歩行速度は有意に速く、個人間のばらつきが大きく標準偏差(SD)が大きかった。さらに、両群間に有意差が認められた変数は、踵着地時の爪先高、踵着地時の爪先高/下肢長、体幹、膝関節、足関節における踵着地時と爪先離地時の角度であった(表3)。

膝関節、足関節角度については、先行研究ではゴニオメーターを用いて測定し、立位時の値によりデータ補正している。一方、本研究における膝関節の角度は、大転子-大腿骨外側上顆-外果の成す角度、足関節の角度は、大腿骨外側上顆-外果-第5中足骨頭の成す角度としており、立位時の値によりデータ補正していない。体幹の角度については、先行研究、本

研究共に画像解析により算出している。しかしながら、体幹の角度の定義が異なり、先行研究は（肩峰－大転子－水平面の成す角度）、本研究は（第7頸椎－左右大転子の中点－水平面の成す角度）であった。当然の事ながら、関節角度の定義が異なると算出値が異なる（柳川 2003a）。さらに、本研究の方が歩行速度の平均値が速く、SD がかなり大きい。これらの要因により、両群間に有意差が認められたものと考えられる。しかしながら、体幹の動揺角度、膝関節と足関節の角度変位に関しては、両群間に有意差は認められなかった。すなわち、関節角度の定義に影響を受けない角度変位は、ほぼ同様の値を示したということである。したがって、測定方法や関節角度の定義が同じであれば、両群間に有意差は認められない可能性が高い。

踵着地時の爪先高、踵着地時の爪先高／下肢長について検討してみる。本研究では、母指の内側（第1基節骨の内側）と床面までの距離を踵着地時の爪先高とし、先行研究では、親指の爪（第1末節骨の上側）と床面までの距離を踵着地時の爪先高とした。この定義の違いにより、本研究の踵着地時の爪先高が小さかったものと考えられる。また、本研究では、母指の内側に反射マーカを貼付したことにより、歩隔が大きくなり、歩容に影響を与えた可能性も否定できない。歩行動作に影響を与えない場所に反射マーカを貼付するように注意が必要である。

以上のことにより、各関節角度や踵着地時の爪先高の定義を同一にしたならば、各変数に関して先行研究とほぼ同様の値が得られるものと考えられる。したがって、本3次元歩行動作解析システムは有効であると結論できる。

## V. 要 約

本研究では、フィールドにおける3次元歩行動作解析システムの有効性と課題を明らかにすることを目的とした。撮影は、4台のデジタルビデオカメラを光信号により同期させ行った。まず、測定精度を明らかにするた

めに、距離と角度における実測値と算出値の誤差を検討した。次に、若年者男子10名を被検者とし、本システムを用いてフィールドにおいて撮影した歩行動作を分析し、自由歩行中における先行研究と本研究の変数を比較した。その結果、以下のことが明らかになった。

1) 身体全体が撮影された映像から細かな角度や距離の解析を行う場合、巨大スクリーンなど大きなプロジェクターを使用するとデジタイズ誤差が小さくなるので望ましい。

2) 各関節角度や踵着地時の爪先高の定義を同一にしたならば、各変数に関して先行研究とほぼ同様の値が得られるものと考えられる。したがって、本3次元歩行動作解析システムは有効であると結論できる。

## 文 献

- 安藤 幸司 (1988) 映像解析最前線. Jpn J Sports Sci 7(9) : 554-561
- Judge J, Davis RB, et al. (1995) : Age-associated reduction in step length: Testing the importance of hip and ankle kinetics. Gait & Posture 3(2) : 81
- Judge JO, Davis RB, and Ounpuu S (1996) : Step length reductions in advanced age - The role of ankle and hip kinetics -. J Geront 51A (6) : M303-M312
- Kaneko M, Morimoto Y, Kimura M, Fuchimoto K, Fuchimoto T (1991) : A kinematic analysis of walking and physical fitness testing in elderly woman. Can J Sports Sci 16(3) : 223-228
- Murray MP, Drought AB, Kory RC (1964) : Walking patterns of normal men. J Bone Joint Surg 46A (2) : 335-360
- Murray MP, Kory RC, Clarkson BH (1969) : Walking patterns in healthy old men. J Gerontol 24 : 169-178
- Winter DA (1983) : Biomechanical motor patterns in normal walking. Journal of Motor Behavior 15(4) : 302-330
- Winter DA, Patla AE, Frank J S and Walt SE (1990) Biomechanical walking pattern changes in the fit and healthy elderly. Phys Ther 70 : 340-347
- 柳川 和優, 磨井 祥夫, 山口 立雄, 渡部 和彦 (2002) 筋放電パターンからみた高齢者における歩行動作の特徴. 日本運動生理学雑誌 9(1) : 33-45.
- 柳川 和優 (2003a) 歩行中における体幹角度の解析. 広島経済大学研究論集 26(1) : 21-30.

柳川 和優, 磨井 祥夫, 山口 立雄, 渡部 和彦 (2003b) 若年者と高齢者における歩  
行動作の比較—歩行速度に着目して—. バイオメカニクス研究 7 (3): 179-192