

人の立位平衡時におけるフィードバック制御解析 (1)

— 3次元 Video 画像計測データと平衡機能検査データの利用 —

Feedback Control in Maintenance of Standing Balance by Humans:

1. Analysis by 3D Videogrammetric Data and Data from Test on Balancing Ability

鶴 岡 政 子*・柴 崎 亮 介*・和 田 孝 雄**

エルジーン オー ボックス*・村 井 俊 治*

Masako TSURUOKA, Ryosuke SIBAZAKI, Takao WADA,

Elgene O. BOX and Shunji MURAI

1. は じ め に

近年、リハビリテーション医学の重要性¹⁾に期待が高まっている。神経系、筋肉骨格系、循環器系統の機能低下による運動機能障害を起こした人の全身的な回復治療、生活適正復帰、スポーツ選手のクリニック、スポーツ適正あるいはフィジカルフィットネス（体力良好）の側面からその対象となる分野は広範囲である。身体の立体空間での経時的な運動を対象としているため、現在は運動学、運動力学を導入したバイオメカニクス解析^{2),3)}が要求されている。

生体には生体恒常性ホメオスタシスが働き、運動に必要な骨関節系、神経系、感覚器系の相互作用に加えてエネルギーの確保のためには呼吸、循環系が機能し、生体全体の平衡機能が維持される。

本報告では立位平衡時の安定性に焦点をしぼり、立位平

衡状態を維持しようとするフィードバック制御機能を新しい試みとして次の2視点から、バイオメカニクス解析を行うと被験者健常人14名に共通性と個々に特徴のある結果が示された。

1) 3次元 Video 画像計測データによる身体の主要関節中央点の立体空間での動きの方向と速度の経時変化。

2) 平衡機能検査データによる閉眼時、開眼時の左右足圧力中心位置、動揺の軌跡、面積、長さ、速度の経時変化。

2. ステレオ撮影と3次元 Video画像解析

CCD Video Camera によるステレオ撮影は写真1のように室内（東京大学生産技術研究所会議室使用）で行った。ステレオ撮影は2台のカメラの matching 録画が課題である。1台の Time Generator（写真2の no. 7）から左右の3 CCD Video Camera（no. 1, 2）と連結した左右の

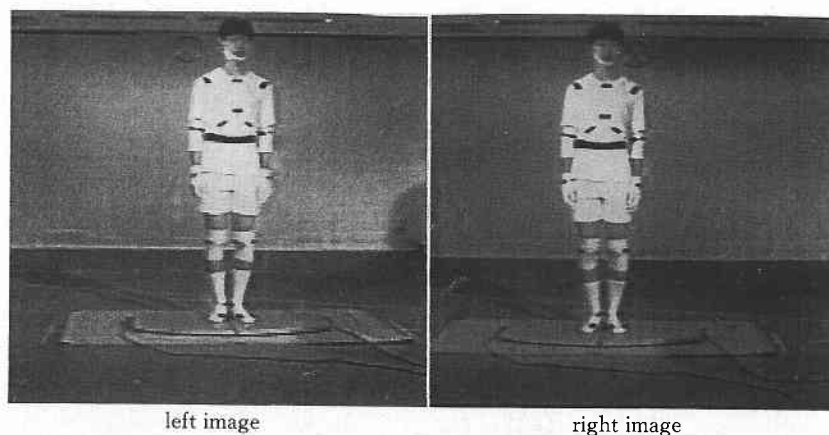


写真1 ステレオ Video 画像

*東京大学生産技術研究所 第5部

**東京都稲城市立病院 内科学

研 究 速 報



写真2 ステレオ CCD Video Camera 撮影

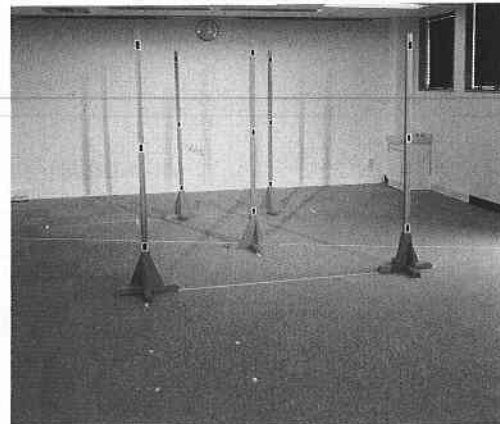


写真3 基準点配置

表1 3D解析値を得る流れ

Video Controller による自動再生 (30コマ/sec)
左右 Matching Video Image Sampling (SVHS)
画像 A/D 変換 (画素512×480)
全体画像 輝度変換 輝度>0 にする
各身体計測点 輝度=0 にする
反転による2値化
各計測点の Window を設定 (他の計測点と重ならないように)
各計測点 Numbering
身体計測 画像左座標 $Pli(xli, yli)$ 右座標 $Pri(xri, yri)$
Video Camera 受光面写真座標へ変換
左変換座標 $Pli'(xli, yli)$ 右変換座標 $Pri'(xri, yri)$
BirdMan bundle adjustment (self calibration)
(地上座標) $Gi(xgi, ygi, zgi)$

Video Recorder (no. 5, 6) へパルスを送り, Head Horn (no. 8) で確認, 左右画像に同時記録する方法をとった. 画像は Video Monitor (no. 3, 4) で確認, 立位平衡訓練評価システムの操作, 被験者への指示をする人 (no. 10) に従い, 被験者 (no. 9) は開眼, 閉眼による立位姿勢を保つ. 上下白色着衣, 肘, 膝等の関節には白色サポータをして, 運動の生理軸を考慮して主要関節点にマークを貼った.

左右の SVHS テープに録音されたパルスを time record 印字に変換し, 写真1のように左右のステレオ画像が得られた. 表1からわかるように Video Controller 付き Video Reader を使い, CCD Camera の録画速度と同じ60コマ/秒で鮮明な自動画像サンプリングし, 図1のように各関節計測点を2値化, 全体を見通して, 計測点が重ならないようにウインドウを設定, ナンバリングをして, 自動計測を行った. 得られた画像データを Camera 側の座標系に変換し, Bundle 法 BirdMan 3次元解析測量システムを応用, あらかじめ行った写真3のような基準点撮影により, 左右カメラのレンズ中央位置 (X_0, Y_0, Z_0) , 回転角度 (ω, ϕ, κ) を求め, キャリブレーションは主点位置のずれ, レンズ歪みまでを考慮すると次のような結果となった. 身体の各関節点の地上3次元解析経時データを得た.

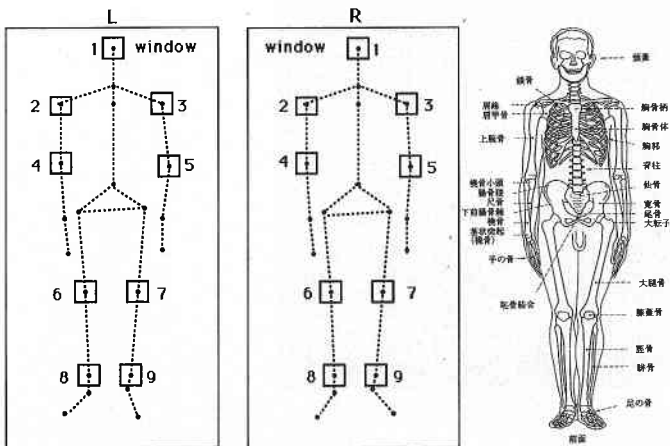


図1 身体計測点の2値画像

外部標定要素		
レンズ中心		
	left camera (m)	right camera (m)
X_0	0.12606	1.22270
Y_0	1.06036	1.01934
Z_0	5.81066	5.73606
レンズ角度 (deg)		
ω	0.72617	-0.00419
ϕ	0.07052	-0.03129
κ	0.00897	0.00605
写真上平均2乗誤差		
Step 1 calibration なし		0.05242 mm
Step 2 主点のずれ		0.05238 mm
Ptep 3 主点のずれ+レンズ歪み		0.03484 mm

3. 人の立位平衡時のフィードバック制御機能の
バイオメカニクス解析

表 2 被験者

NO	年齢	体重	身長	職業	スポーツ
1	35才	63 Kg	164 cm	研究員	野球 ゴルフ
2	26	62	166	大学院生	水泳
3	43	67	184	研究生	卓球
4	23	62	173	大学院生	スキー
5	25	56	171	大学院生	スキー
6	35	63	170	教官	テニス
7	25	66	170	大学院生	サイクリング
8	23	62	167	大学院生	なし
9	23	62	168	大学院生	サーフィン
10	21	63	170	大学生	合気道
11	20	66	178	大学生	合気道
12	30	65	175	会社員	なし
13	42	67	169	会社員	合気道
14	25	55	165	大学院生	バドミントン

表 2 に示す被験者14名は成人男子。すべて健常人で骨折等の外科的疾患歴はない。

身体の動きを立体空間にて観察する時は図 2 のように身体内部に想定される重心点を通る相互に垂直な基本前額面、水平面、矢状面を考え、身体各部位の動きの方向をとらえる。

1) 3次元 Video 画解析データによる身体の主要関節中央点の立体空間での動きの方向と速度の経時変化。

1/60秒の速度で得られた身体主要関節中央点の3次元座標値を用いて前額面、矢状面での動きの速度比較を行った。立位平衡訓練評価システムのテストから左右足圧力中心位置動揺の平均的な者の結果を示すと図 3 の頭と右肩関節速度比較、図 4 の頭と右膝関節速度比較、図 5 の左右の肩関節の前額面 ($dV_x = dx/dt$) での速度比較から静止立位姿勢においても常に各関節はその方向と、位置を変化させており、床面から遠くなる程速度変化が大きいく姿勢維持のためのフィードバック制御を繰り返している。左右の関節の動きは必ずしも対称的ではない。図 6 ~ 8 の矢状面 ($dV_z = dz/dt$) での動きを見るとより顕著な変化が認められた。動きの速度や方向が異なるがこの特徴は被験者全体に共通した現象であった。

2) 平衡機能検査データによる閉眼時、開眼時の左右下肢の荷重変化、足圧力中心位置、動揺の軌跡、面積 ($S = (X_{max} - X_{min})(Y_{max} - Y_{min})$)、長さ ($D = \int_0^t \sqrt{(\frac{dw}{dt})^2 + (\frac{dY}{dt})^2} dt$)、速度の経時変化。

立位平衡訓練、荷重移動訓練、重心移動訓練ができる立位平衡訓練評価システム (アニメ社製 G6100) を使用、

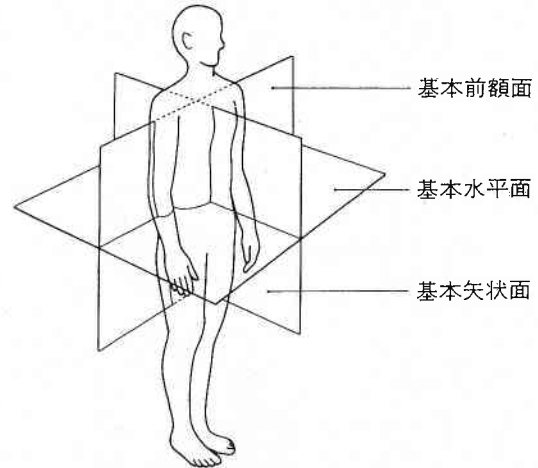


図 2 身体運動の基本平面 (参考文献 1 より)

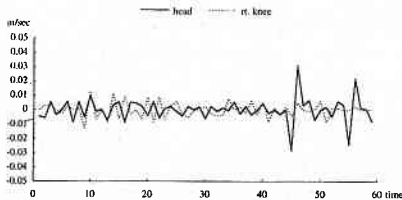


図 3 頭と右肩関節の速度変化 (前額面)

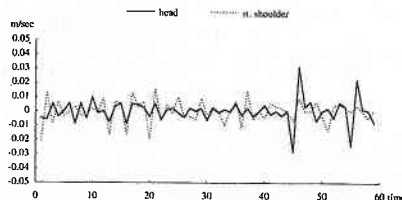


図 4 頭と右膝関節の速度変化 (前額面)

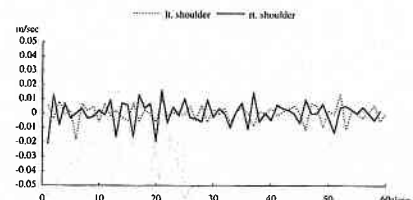


図 5 左右肩関節の速度変化 (前額面)

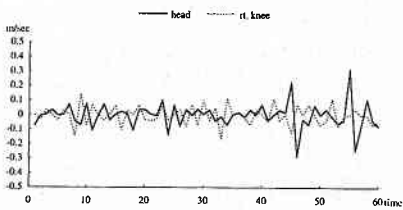


図 6 頭と右肩関節の速度変化 (矢状面)

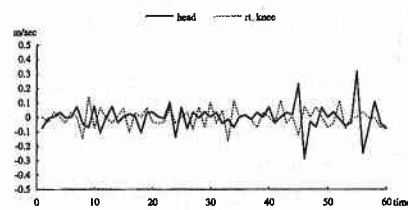


図 7 頭と右膝関節の速度変化 (矢状面)

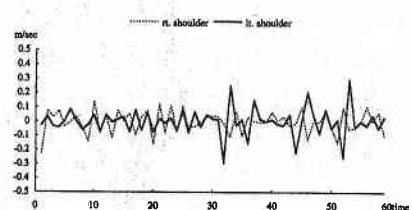


図 8 左右肩関節の速度変化 (矢状面)



写真4 立位平衡機能検査

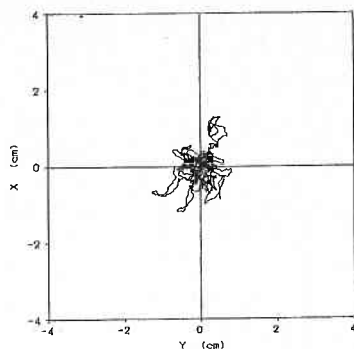


図9 左右足圧力中心位置動揺の軌跡 (開眼時)

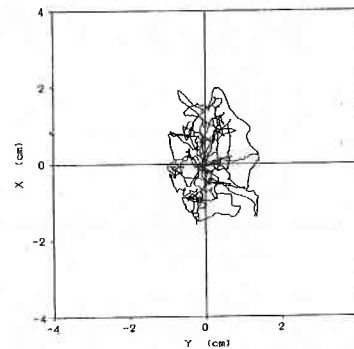


図10 左右足圧力中心位置動揺の軌跡 (閉眼時)

写真4のように2枚のフォースプレートセンサーの上に被験者が立位姿勢を1分間保持、50 msec毎の計測で1200個の連続データが得られた。視覚によるフィードバック制御を除くと、左右下肢の荷重変化の動揺による振幅の大きさが著しく、足圧力中心(左右足圧点のモーメント中心点)位置の動揺軌跡は図9の開眼時、図10の閉眼時で示されるように、面積、長さ共に共通して大きな動揺が示された。面積、長さは人により特徴を持つ。矢状面での平均速度($V_x=dx/dt$)をみると $0.5 \text{ cm/sec} < A < 0.7 \text{ cm/sec}$ 4名、

$0.7 \text{ cm/sec} < B < 0.9 \text{ cm/sec}$ 6名, $0.9 \text{ cm/sec} < C < 1.1 \text{ cm/sec}$ 4名に分けられた。前額面での平均速度 ($V_y=dy/dt/60$) は $0.4 \text{ cm/sec} < A < 0.5 \text{ cm/sec}$ 5名, $0.5 \text{ cm/sec} < B < 0.8 \text{ cm/sec}$ 7名, $0.8 \text{ cm/sec} < C < 1.2 \text{ cm/sec}$ 2名で、矢状面での速度が比較的速い結果が示された。

4. 考 察

人の立位姿勢は傾斜している骨盤の上に脊柱があり、重い頭を支え、力学的には不安定な構築になっている。しかしながら人の生体には2つの intrinsic feedback, augmented feedback 制御機能が働き、平衡状態を保ち、重力に抗して安定化をはかろうとする。本報告では視覚情報を除いた場合の健常人の立位姿勢のフィードバックパフォーマンスの安定性に注目した。3次元 Video 画像計測データと同時計測したフォースプレートセンサーによる左右足圧力中心位置検査データから、身体各関節の立体空間の制御は、頭に近い位置ほど、矢状面の安定性が減少するが、その大きさおよび足圧力中心位置の動揺の安定性は人により特徴的であった。速度変化においても同じ傾向がみられた。従いスポーツ、登山、長時間同じ姿勢で仕事をしたり、楽器を演奏後のフィードバック機能のチェックをし、自己の健康状態を把握しておくことは予防医学につながり、健康維持に重要な知見を与えると思われる。医学と工学の視点から定量的な解析により生体のフィードバック現象を洞察する視野を広げる結果をなしたことは意義深い。

謝 辞

建設省国土地理院小井土今朝巳氏、東京大学生産技術研究所前田研究室宮島省吾氏、同研究所映像室中村英俊氏、国立療養所東埼玉病院リハビリテーション科森英二氏、東京大学医学部リハビリテーション科木村伸也氏にご指導、ご協力を頂きましたことを深く感謝致します。

(1993年10月14日受理)

参 考 文 献

- 1) 中村隆一, 齊藤 宏:基礎運動学3版, 医歯薬出版, 1987.
- 2) 鶴岡政子, 村井俊治:写真測量による人の歩行の3次元バイオメカニクス解析, 生産研究 Vol.45, No.4, pp69-72, 1993.
- 3) 鶴岡政子, 森 英二, 柴崎亮介, 村井俊治:Video 画像を利用した人の動きのリハビリテーションへの応用, 日本写真測量学会平成5年度年次学術講演会発表論文集, pp129-132, 1993.