

3次元 Video 画像解析によるリハビリテーション医学への応用

Study for Medical Rehabilitation Science using 3-D Video Image Analysis

鶴 岡 政 子*・森 英 二**・柴 崎 亮 介*・村 井 俊 治*

Masako TSURUOKA, Eiji MORI, Ryosuke SIBASAKI and Shunji MURAI

1. は じ め に

脳血管障害のために身体の片側の筋肉弛緩、関節機能低下をきたし、日常生活における動作の支障を持つ片麻痺患者の治療、訓練の過程を把握する目的で、リハビリテーション医学では、Video Cameraによる記録、観察を行っている。3-D空間での人の動きのデジタル化ができれば、画像から連続した時系列データを媒介として医師、患者、理学療法士が共通の視点を持ち、共に目標を持ってリハビリテーション治療に励むことができる。本報告では、ステレオ Video 画像に Bundle Adjustment 法を応用させて身体の主要関節の動きの3-D値を求め、3次元バイオメカニクス解析と自己回帰モデルによるスペクトル解析からインパルス応答を求めて、動きの定量的解析を行った。

2. 3次元 Video 画像解析

1) 撮影方法

非測定用 CCD Video Camera を 2 台使用し、病院内のリハビリテーションセンターで入院中の片麻痺患者（男性 56歳，身長166cm，体重66.5kg，自立歩行不可能，車椅子使用）が写真1から写真2のように台（高さ40cm）に腰かけているところから立ち上がるまでの連続した動きを撮影した。

関節の動きの中心は運動障害を持つ人の装具を作成する際、重要な指標となり、中心を身体表面から推定するには、資料に示すように、装具学¹⁾、Kinesiology²⁾を参考に、身体主要関節の計測箇所をテープでマークをした。

2) 3次元解析理論と結果

Video 左右画像の9個のG.C.P.画像座標をCCD Video Cameraの受光面を写真座標とする座標系へ変換、3次元

解析写真測量システム³⁾ (BirdMan System: self calibration 付き bundle adjustment) を応用、外部標定要素の左右のカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と傾き (ω, ϕ, κ)、誤差モデルを付加して非測定用カメラの精度を向上させるため、内部外部標定要素の主点位置の移動量、レンズ歪みの補正係数も同時に求め次式により各要素の解が得られる。

x, y : 写真座標, f : 焦点距離, X, Y, Z : 測点座標, X_0, Y_0, Z_0 : 投影中心座標, ω, ϕ, κ : 投影中心傾き, $a_{11} \sim a_{33}$: 測点座標, x_0, y_0 : 主点位置の移動量, $d_1 \sim d_3$: レンズ歪み補正係数, $p_1 \sim p_6$: フィルム変形補正係数とする。



写真1 Video 画像 (立ち上がり始め)



写真2 Video 画像 (立ち上がり終わり)

*東京大学生産技術研究所 第5部

**国立療養所東埼玉病院 理学療法科

研 究 速 報

標定計算結果

$$\left. \begin{aligned} x &= -f \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + dx \\ &= F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa, dx) \\ y &= -f \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + dy \\ &= G(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \kappa, dy) \end{aligned} \right\} \dots(1.1)$$

	右カメラ	左カメラ
X_0	-2.0977 m	3.2932 m
Y_0	1.1530 m	0.9698 m
Z_0	2.9808 m	3.0812 m
ω	0.0731 deg	0.0448 deg
ϕ	0.6633 deg	0.0113 deg
κ	0.0089 deg	0.0112 deg

$$\left. \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = R\omega \cdot R\phi \cdot R\kappa \right\} \dots(1.2)$$

$$R\omega = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix} \quad R\phi = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & \sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix}$$

$$R\kappa = \begin{pmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} dx &= x_0 + x'(d_1r^2 + d_2r^4 + d_3r^6) + p_1x' \\ &\quad + p_2y' + p_3x'y' + p_4y'^2 \\ dy &= y_0 + y'(d_1r^2 + d_2r^4 + d_3r^6) + p_5x'y' + p_6x'^2 \\ x' &= x - x_0 \\ y' &= y - y_0 \\ r^2 &= (x'/F)^2 + (y'/F)^2 \end{aligned} \right\} \dots(1.3)$$

式 (1.1) を近似値のまわりにテーラー展開し, 次の線形観測方程式 (1.4) を作る.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial F}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial F}{\partial Z_0} \Delta Z_0 + \dots + \frac{\partial F}{\partial p_6} \Delta p_6 = vx \\ \frac{\partial G}{\partial X_0} \Delta X_0 + \frac{\partial G}{\partial Y_0} \Delta Y_0 + \frac{\partial G}{\partial Z_0} \Delta Z_0 + \dots + \frac{\partial G}{\partial p_6} \Delta p_6 = vy \\ vx = x - x'' \\ vy = y - y'' \end{aligned} \right\} \dots(1.4)$$

(1.4) の観測方程式を最小二乗法により解き, 近似補正量を得て, 次の結果が得られた.

写真上平均 2 乗誤差結果は次のようになった.
主点のずれ+レンズ歪み を考慮 0.0669 mm

人の動きの解析を行うのに適当と判断し次に非接触による身体計測点の 3 次元測定を行った.

3) 身体計測点 3 次元地上座標値計算

2) の結果を用いて, 次式を使い, 計測点の 3 次元地上座標値を得る.

$$\left. \begin{aligned} X - X_0 &= u(Z - Z_0) \\ Y - Y_0 &= v(Z - Z_0) \\ u &= \frac{a_{11}x + a_{21}y - a_{31}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} \\ v &= \frac{a_{12}x + a_{22}y - a_{32}f}{a_{13}x + a_{23}y - a_{33}f} \end{aligned} \right\} \dots(1.5)$$

1 バンドル (光束) に対し, 次式が得られ, これを 2 バンドルについて最小二乗法で解くと, 計測点の地上座標値が求められる.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -u \\ 0 & 1 & -v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0 - Z_0u \\ Y_0 - Z_0v \end{pmatrix} \dots(1.6)$$

方法としては, 左右 Video 画像の matching を可能にするため time generator を使用するとよいが, 本報告では, スタートと同じ動きの始めに設定し, time count を左右の画面に印字し image sampling 後, Video image の A/D 変換, 画面全体の輝度変換 (シフト量を up), 測定点 (主要関節点) の輝度値を 0 とし, 2 値化した図 1 の黑白画像を得る. 立ち上がる動作までの 2 秒間程の連続した 2 値画像から Video Controller により自動的に写真座標値を得る.

3. 片麻痺患者の立ち上がり動作の解析

1) 3 次元バイオメカニクス解析

運動学を人の動きの解析に応用したバイオメカニクス解析を行うには, 身体を頭, 体幹, 前腕, 上腕, 手, 大腿, 下腿, 足の各体節に分けて剛体とみなし, それらが関節で連結されているリンク人間モデルを導入して剛体の運動学,

力学を応用して解析すると理解しやすい⁴⁾. 研 究 速 報

a) Compter Graphics Stick Picture Model による動きの Simulation

麻痺側と健常側の比較をすると、図2は立ち上がり始めから起立までの40×1/30秒間のフォームの移り変わりを示している。上段は正面図で、左右が対称な動きではなく、健常側に依存した動きとなっている。中段は麻痺側図（患者身体の右側）、下段は健常側図（患者身体の左側）を示す。麻痺側の動きは立ち上がりの部分では、関節の屈曲が、起立の部分では伸展が健常側より少ないことが示された。

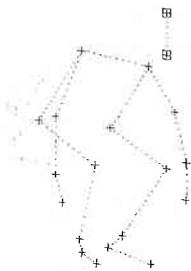
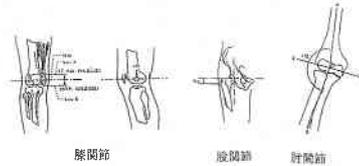


図1 2値画像（写真1の身体の2値化）

b) 主要関節の変位

図3から図11中のX軸は前額面、Z軸は矢状面での動きを表す⁵⁾。縦軸は地上の原点を基準点格子の手前左頂点に置いての計測値で、横軸に時間をとった。

顕著な動きの違いがある部分に関して述べると上肢での動きを見ると、図3の肩関節では、矢状面で麻痺側は健常側より常に前方に位置している。図4の肘関節の前額面において麻痺側は体幹側に近づく。図5の矢状面での動きは肩関節と同様に麻痺側は健常側より前方の動きとなっている。肩関節の場合よりその差は大きい。図6の股関節では、矢状面での動きが特徴的で、立ち上がり始めの際健常側の動きが大きいことが示されている。図7の膝関節の前額面では、健常側が安定している。



資料 主要関節の中心（装具学より）

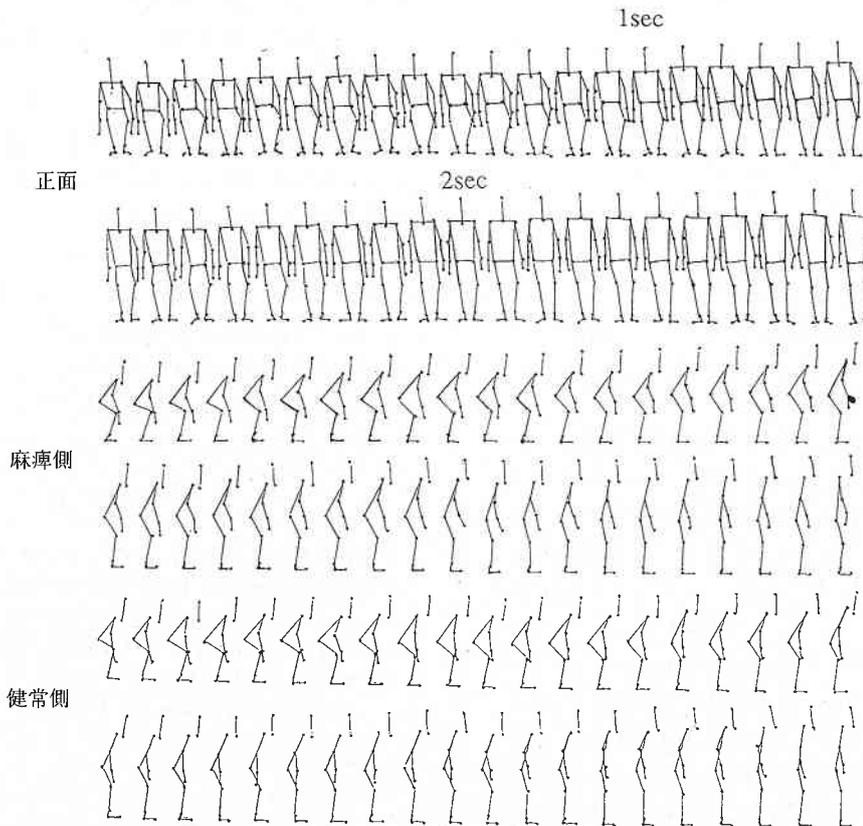


図2 Stick Picture Model による立ち上がり動作 (40 × 1/30 sec)

研究速報

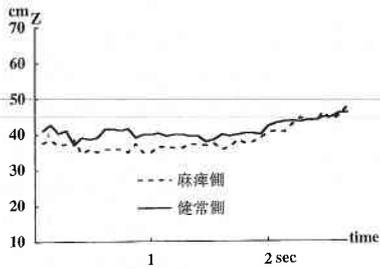


図3 肩関節の変位 (矢状面)

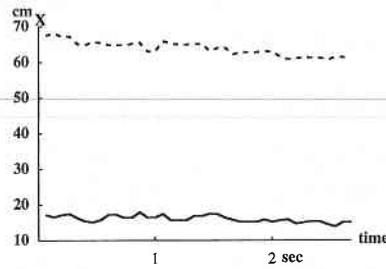


図4 肘関節の変位 (前額面)

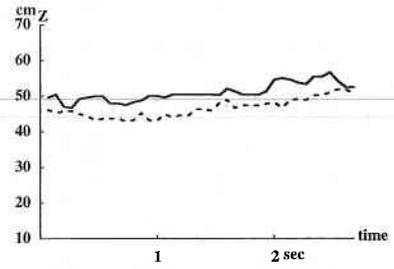


図5 肘関節の変位 (矢状面)

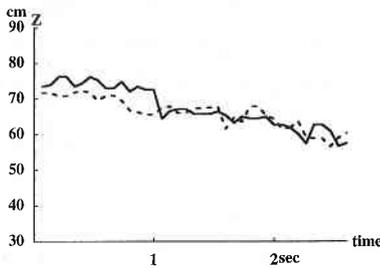


図6 股関節の変位 (矢状面)

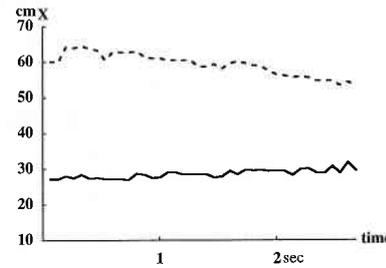


図7 膝関節の変位 (前額面)

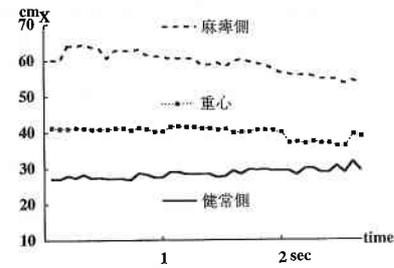


図8 体重心と左右膝の変位 (前額面)

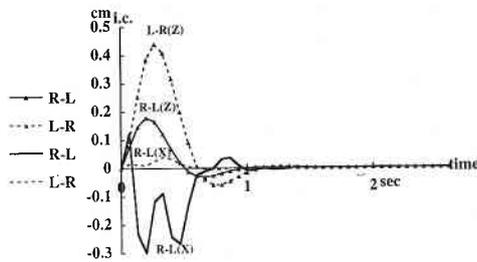


図9 インパルス応答

c) 体重心変位と膝関節変位の比較

図8の重心の変位は健常側の変位のカーブと類似しており、また麻痺側の変位位置よりも健常側よりであることが示される。

2) インパルス応答⁵⁾による立ち上がり動作の解析

立ち上がり動作は時間の経過と共に動作のフィードバック制御が働きながら起立動作へと向かう。本報告では、麻痺側と健常側の膝の動きに注目して、スペクトル解析をするため自己回帰モデルを導入し、インパルスを1.0cm与えた時の応答を求めた。

図9の前額面(X)での膝のインパルス応答を見ると、健常側(L)から麻痺側(R)への応答が麻痺側から健常側への応答より大きく、インパルスを与えた直後は正の方向へ応答があったが次には負の方向を示す。すなわち始めは、インパルスを与えた方向と同じ方向に応答が起きたが次には反対の方向へ応答がなされたことになる。カーブをみてもその値は減少の方向へ向かいながらまた増加し、減

少するという不安定な状態である。矢状面(Z)ではインパルスを与えた方向と同じ方向に応答が見られ、麻痺側の膝のインパルスの吸収が弱いことが示された。

4. 考 察

3D画像情報から身体の主要関節の3次元解析値を得て、バイオメカニクス解析とインパルス応答解析により、麻痺側は健常側に依存しての動きとなっていることがわかり、麻痺側の治療、訓練は健常側の負担を軽減するためにも必要であり、時系列解析はバランスのとれたリハビリテーション医学への指標として期待が持てる。各関節の協調性と重心との関係のスペクトル解析により人が動いている状態のフィードバック制御機構解析を次の課題としている。

(1994年4月8日受理)

参 考 文 献

- 1) 日本義肢装具学会：装具学，医歯薬出版，1987.
- 2) Arthur Steindler et al. : Kinesiology on the human body fourth printing, Charles C Thomas Publisher, 1970.
- 3) 日本写真測量学会：解析写真測量改訂版，1983.
- 4) 鶴岡政子，森 英二，村井俊治，小井士今朝巳：LEDsを利用した写真測量による人の動きの解析，写真測量とリモートセンシング，vol. 32, no. 2, pp. 15-24, 1993.
- 5) 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：人の立位平衡時におけるフィードバック制御解析(2) 多変量自己回帰モデルの利用，生産研究第46巻第1号，pp. 37-40, 1994.