

片麻痺者のシルエット画像とモデルのマッチングによるブルンストロームステージの推定

- 確率学的手法による運動と状態の推定 -

Estimation of Brunnstrom Stage by Silhouette Matching of Hemiplegic people and Models

- Estimation of Motion and State by Probabilistic Method -

○ 涌井靖章（日大） 遠藤央（日大） 柿崎隆夫（日大）

Yasuaki WAKUI, Nihon University

Mitsuru ENDO, Nihon University

Takao KAKIZAKI, Nihon University

Abstract: In this study, to support handicapped people, especially focusing on a hemiplegic person, a life support system is proposed. To improve their QoL, the system is required to support them enough in early rehabilitation. Thus, the system, which measures and estimates a state and a condition of a patient through analysing RGB images, is proposed. In this paper, the system using a camera and algorithms for processing an image of the camera to addition to this, algorithms for processing an image of the camera and estimating movements of patients are applied to the system. Specifically, on an experimental system, the state and the movement of models are estimated collectly based on the proposed method.

Key Words: Brunnstrom Stage Diagnosis, Automatic Diagnosis, Digital Human Model

1. はじめに

障害者自身による早期の日常生活活動（ADL：Activities of Daily Living）はリハビリとなり機能回復につながる⁽¹⁾。ここで障害者に対して過度にADLを支援するとリハビリの機会を奪い、身体機能の低下を招く恐れがある。一方、支援が不足し障害者自身がむやみにADLをすると怪我をする恐れもある。したがって障害者個人の状態や症状に応じ、過不足なく支援をすることで、リハビリ効果のあるADLを促す必要がある。

しかしながら現在研究開発されている生活支援システムは、障害者の身体や機能の不自由に対して、補助や強化を目的としたものが主である⁽²⁾。これらシステムの支援によって健常者に近い動作を実現出来る。しかしADLの機会が減る場合があり、症状の改善が望めなくなる事例が考えられる。また、個人差があり日々変化する障害者の症状や状態を知りリハビリに活用するためには、医師やOT、PTによる観察指導では限界がある。よって本研究では過不足ない支援によるADLの促進のために、システムによる障害者の症状や状態の推定を目指す⁽³⁾。これにより障害者の早期社会復帰を支援する。

2. 複数RGB-Dセンサを用いた状態推定システム

従来より人間の動作計測としてモーションキャプチャがあるが、マーカを装着する必要があるため障害者への身体的負担を要求する。そこで本研究では、障害者の動作を非接触に計測し推定する。障害者の状態はブルンストロームステージ（BS：Brunnstrom Stage）⁽⁴⁾によって分類する。ここでBSの判定には上田らの提案する12段階片麻痺回復グレード法（上田法）⁽⁵⁾を用いる。具体的には支援対象者の動作を計測し、その関節位置・角度情報に基づき回復段階を判定する。これをシステムに実装することで自動的にBSを推定可能となる。

本研究ではこれまでに、RGB-Dセンサを用いた障害者の状態推定システムを提案した。RGB-Dセンサの位置校正手法を提案し⁽⁶⁾、センサ情報を解析しADLからBSを診断することに成功した⁽⁷⁾。しかしながら、RGB-Dセンサを用いた障害者の状態推定システムの課題として、腕や脚などの身体の一部が隠され死角となり関節位置が計測できない状態が挙げられる。この死角を無くすため従来システムでは複数台のRGB-Dセンサで障害者を計測している⁽⁸⁾。

本システムはRGB-Dセンサによる計測情報の使用が前提であるため、RGB-Dセンサの設置が必要となる。したがって本研究ではADLの計測のために一般家庭にセンサを導入する必要がある。しかしながら、一般家庭に複数台のRGB-Dセンサを設置することは容易ではない。したがって、より一般的な計測手法を用いることが求められる。以上のことから、本稿ではカメラを用いた障害者の状態推定システムを提案する。

3. カメラを用いた状態推定システム

Fig.1に提案するシステムのコンセプトを示す。提案システムは、障害者のシルエット画像とモデルの照合によりBSを推定する。本研究で提案するシステムではビデオカメラを用いて障害者を撮影した映像から状態を推定する。具体的には撮影した映像から各時間における画像を抽出し、背景差分法を用いた動体抽出を適用することで障害者のシルエット画像を生成する。一方で、デジタル人間モデル（DHM：Digital Human Model）を用いて、各姿勢におけるシルエット画像を生成する。障害者のシルエット画像とDHMのシルエット画像をマッチングし、シルエットが近似的に一致するモデルとその姿勢を探索する。探索したDHMの関節位置・角度情報とステージの分類から障害者のBSおよび運動を推定する。

提案するシステムにおいて各DHMからシルエット画像を生成するとき、任意視点から生成可能である。したがって、障害者とDHMのシルエットを照合する組み合わせは無制限通り存在する。照合する画像の枚数が増えるほど計算量および処理時間が増加するため、効率のよいマッチングが望まれる。

そこで本研究ではマッチングにパーティクルフィルタを用いる。パーティクルフィルタを使用することで、障害者の動作を撮影した映像から生成したシルエットと尤もらしいDHMのシルエットを逐次的に絞り込むことが出来る。また、シルエットの照合は時系列の処理であるため、事前の状態を示すシルエット画像から事後の状態を予測することで、効率的な処理を実現する。

パーティクルフィルタとは、状態の確率分布をパーティクルの集合で表現する手法である。パーティクルフィルタのアルゴリズムはサンプリング、予測、観測、尤度計算、リサンプリングを繰り返す⁽⁹⁾。初期状態（ $t=0$ ）におけるパーティクルの集合 P_0 を次式に示す。

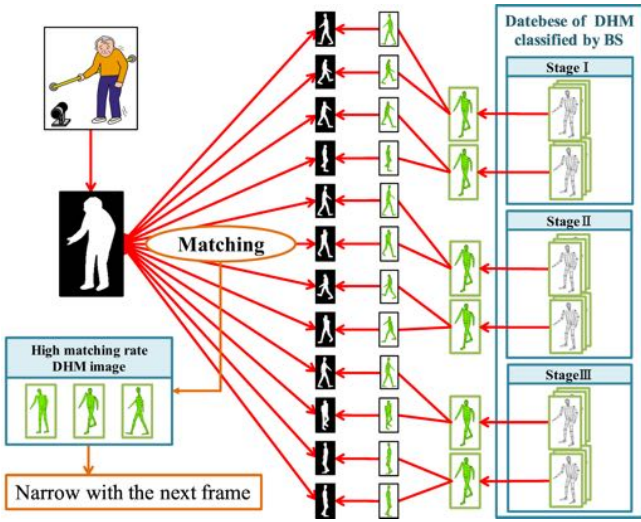


Fig.1 Matching an image and models

$$P_0 = \{ \mathbf{X}_0^{(1)}, \dots, \mathbf{X}_0^{(i)}, \dots, \mathbf{X}_0^{(N)} \} \quad (1)$$

ここに、 N はパーティクルの数であり、 $\mathbf{X}_0^{(i)}$ は任意のパーティクルの初期値である。時刻 t のとき、パーティクルの状態 $\mathbf{X}_t^{(i)}$ を計測対象の画像におけるピクセルの座標 x, y と姿勢 θ のベクトルとし、次式とする。

$$\mathbf{X}_t^{(i)} = [x_j \ y_j \ \theta_j]^T \quad (2)$$

次にパーティクルが移動した後の状態 $\hat{\mathbf{X}}_t$ は次式により導く。

$$\hat{\mathbf{X}}_t^{(i)} = \mathbf{X}_{t-1} + \mathbf{u}_t + \mathbf{v}_t \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{u}_t は状態の予測であり、計測対象の直近の移動量より算出する。 \mathbf{v}_t は推定した状態の誤差であり、本手法では疑似乱数とする。マッチングにより推定した状態 z_t を次式で示す。

$$z_t = \{z_1, \dots, z_M\} \quad (4)$$

ここに、 M は推定した状態 z_t の個数である。

条件付き確率を用いて尤度 $w_t^{(i)}$ を式 (5) より導く。式 (5) は状態 $\hat{\mathbf{X}}_t^{(i)}$ のとき、推定した状態が z_t である確率を表す。

$$w_t^{(i)} = p(z_t | \hat{\mathbf{X}}_t^{(i)}) \quad (5)$$

本論文では尤度の算出に 2 つのシルエットの差分画像を用いる。差分画像は 2 つのシルエットの差分を画素値としているため、全画素の総和が小さいほどマッチング率は高い。差分画像の画素値 $d(m, n)$ は式 (6) により求める。

$$d(m, n) = |V_{src1}(m, n) - V_{src2}(m, n)| \quad (6)$$

ここに、座標 (m, n) における各シルエット画像の画素値を $V_{src1}(m, n), V_{src2}(m, n)$ とする。次に、差分画像の画素値の合計 D_i を式 (7) により求める。

$$D_i = \sum_{(m,n)} d(m, n) \quad (7)$$

このシルエットの差分の合計値 D_i を用いて、 N 個あるうちの状態 i のマッチングの尤度 w_i を式 (8) により求めた。

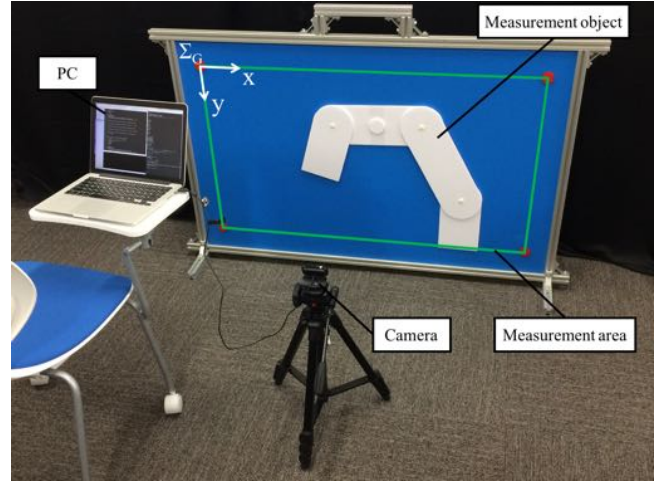


Fig.2 Experimental system

$$w_i = \frac{\frac{1}{D_i} \sum_{j=1}^N D_j}{\sum_{k=1}^N \left(\frac{1}{D_k} \sum_{l=1}^N D_l \right)} \quad (8)$$

このとき尤度はシルエットの差の合計が小さいほど高くなる。

尤度の高いパーティクルを k 個選択し、選択したパーティクルの状態の平均値を推定結果 $\bar{\mathbf{X}}_t$ とする。このときの状態 $\bar{\mathbf{X}}_t$ は画像上の画素の座標であり、実環境での座標を算出する必要がある。そこで推定結果 $\bar{\mathbf{X}}_t$ の x, y を単位をピクセルから距離へ変換する。このとき、画像のピクセル数を $x_{rows} \times y_{cols}$ [px] とし、処理対象領域のサイズを $x'_{rows} \times y'_{cols}$ [mm] とする。状態 $\bar{\mathbf{X}}_t$ は、サンプリング時間 t のときの計測対象における位置座標 x, y と姿勢 θ のベクトルを表す。

$$\bar{\mathbf{X}}_t = [x'_j \ y'_j \ \theta'_j]^T \quad (9)$$

次に計測対象の状態 $\bar{\mathbf{X}}_t'$ は、次式により導出される。

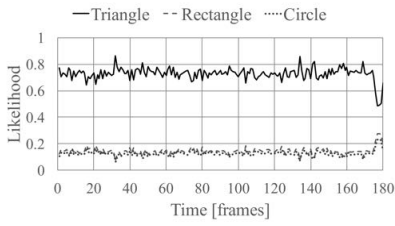
$$\bar{\mathbf{X}}_t' = \begin{bmatrix} x'_{cols} & y'_{rows} & 1 \\ x_{cols} & y_{rows} & \end{bmatrix} \mathbf{I} [x_j \ y_j \ \theta_j]^T \quad (10)$$

ここに \mathbf{I} は 3×3 の単位行列を表す。

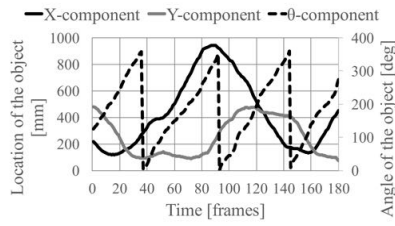
以上により、マッチングの結果から画像における計測対象の状態を推定する。

4. 物体とモデルのマッチングによる推定実験

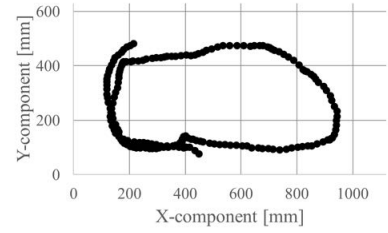
提案するシステムを二次元平面で模擬して実験することで、パターンと運動推定の有効性を検討する。本実験では Web カメラ、コンピュータ、背景ボード、エチレンボードで作成した白色の物体、および Web カメラ固定用の三脚を用いる。背景ボードの平面のフィールドには動作範囲を検出するためのマーカを 4 つ設置する。動作範囲は縦 630mm、横 1120mm とし、マーカ位置を基にホモグラフィ変換を用いて二次元平面情報へ変換される⁽⁹⁾。運動は図中に示す動作範囲の左上に原点を持つ Σ_G に基づき議論される。Web カメラは三脚で固定し、背景ボードの正面に設置する。物体は対で同じ形状のものを作成し、背景ボードを挟んで磁石で固定する。磁石で固定することで、物体を背景ボードの裏側で移動すると表側もそれに追従して移動するため、物体の撮影を妨げずに位置姿勢の変更が可能である。



(a) Likelihood

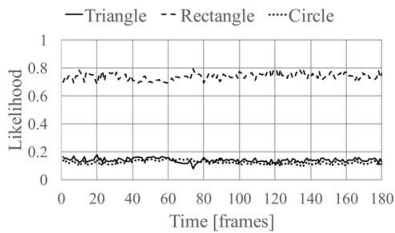


(b) State

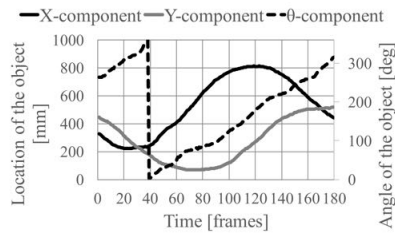


(c) Track

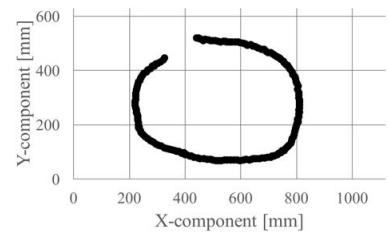
Fig.3 Estimation result of triangle



(a) Likelihood



(b) State



(c) Track

Fig.4 Estimation result of rectangle

実験で使用するシルエットは、撮影した映像より作成したサンプリング時間ごとの画像から作成する。本実験では簡単化のため、背景ボードを青色にすることでクロマキー処理により物体のシルエットを作成する。

4.1 多角形の運動状態推定実験

本実験では、三角形および四角形の物体の形状および位置姿勢を推定する。シルエットをマッチングするためのモデルを円・三角・四角の3パターン用意する。ここで3パターンのモデルは、本研究で提案するシステムにおいてBS別のDHMにあたる。これらを実際にマッチングすることでパターンと運動を同時に推定する。これにより提案手法であるBS別のDHMによる障害者の状態推定の有効性を検証する。

Fig.3に三角形の物体の状態推定結果，Fig.4に四角形の状態推定結果を示す。それぞれ(a)は各形状の物体のマッチング結果に基づき算出した各形状ごとの尤度である。また(b)は各形状の位置姿勢の推定値であり，(c)は推定した物体の位置の軌跡である。グラフより，物体はそれぞれ三角形および四角形の尤度が十分に高く，計測対象の形状を判別出来ることがわかる。また，提案する手法を用いることでそれぞれ物体の動作を推定出来ていることがわかる。

これらより，時計回りに回転しながら時計回りに移動している各形状の計測対象に対し，同じ形状のモデルで位置姿勢を推定しながらマッチング出来ていることがわかる。

本実験では，形状の推定にシルエット画像の差分から算出した尤度から推定している。計測対象の形状を三角形と四角形で変更しても，各モデルの尤度の関係はほぼ同じであったことから，任意の形状を推定することが出来ると考えられる。そのため，シルエット画像の差分から算出した尤度を用いることで形状を十分に推定可能であるといえる。したがって，提案手法を用いることで動作を撮影した映像からモデルの種類ならびに動作が推定可能であることが示唆された。

4.2 多関節を持つ物体の運動状態推定実験

本実験では，多関節を持つ物体の形状および位置姿勢を推定する。形状に人間の腕や脚を模している多関節を持つ物体を使用することで，本システムの計測対象である障害者のシルエットの

マッチングに近い条件を再現している。これにより，障害者の状態推定においても，提案手法により同様な結果が得られることを確認する。

マッチングに使用するモデルは4パターン用意し，最も尤度の高いものを算出することで形状を推定する。また，物体を移動させることで，マッチングしたモデルから形状と位置姿勢を同時に推定出来る。これは本研究で提案するシステムにおいて障害者の動作の推定と該当するBSの判定にあたり，モデルの形状を人間の腕を模した多関節を持つ物体とすることで，本実験により提案手法の有効性を検証出来る。

本実験では3関節を持つ物体の動作を撮影し，モデルとマッチングすることで運動状態を推定する。モデルは，Fig.5に示す4パターンを用意した。モデル1は3関節，モデル2とモデル3は2関節，モデル4は1関節を持っている。Fig.6に多関節を持つ物体の位置姿勢の推定に使用するパラメータを示す。図に示すように，3つの関節部分の位置姿勢と手先位置をパラメータとして使用する。このパラメータを変更することで，様々な形状や位置姿勢のモデルを作成する。これを用いて一致するモデルを推定することで位置姿勢および形状を推定する。

ここで，物体の形状はそれぞれ作成する2種類のモデルに対応していることがわかる。そのため単純なマッチングのみの方法では，対応する2種類のモデルのうちどちらを採用するか定まらない。対して本手法ではパーティクルフィルタにより過去フレームで推定した形状の尤度が推定結果に反映されるため，より正確なマッチング結果を採用することが出来ると予想される。

Fig.7に多関節を持つ物体のマッチング結果を示す。第一縦軸には各形状ごとの尤度，第二縦軸には形状の推定結果を示す。モデル2とモデル4については尤度の変化が小さく，尤度が低いことがわかる。一方で，時間経過とともにモデル1の尤度は変化が大きいが，形状の推定結果は，10フレームまではモデル1とモデル3を交互に繰り返しており，それ以降はモデル1となった。Fig.8に各関節位置の推定結果の軌跡を示す。図より形状の推定結果であるモデル1の動作が推定出来ていることがわかる。したがって，本稿で提案した手法により動作を撮影した映像からモデルの種類ならびに動作が推定可能であることが示唆された。

Fig.7より，各モデルの尤度について10フレーム目までは全

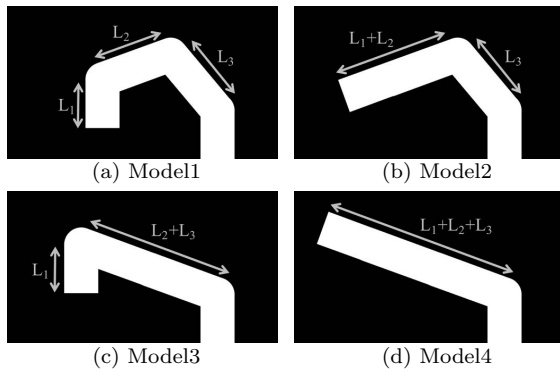


Fig.5 Models of articulated arm

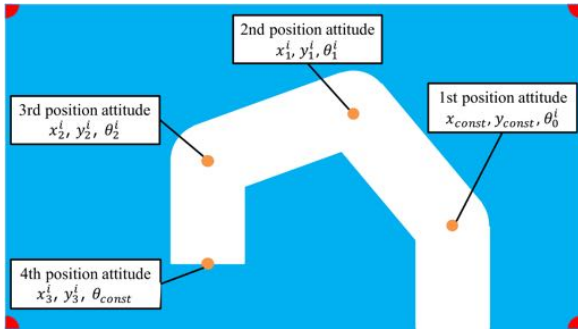


Fig.6 Appearance of articulated arm object

てのモデルで尤度が低く、それ以降はモデル 1 の尤度が高くなっている。時間経過に伴って尤度の高いパーティクルが複製され分布が更新されるため、分布の分散が小さくなるためであると考えられる。

この問題は多角形のような単純な図形ではみられなかった。一方で、多関節を持つ物体では手先に近い関節ほど変数の組み合わせの影響が増え、それに伴ってマッチングするモデルの組み合わせが増大している。そのため、初期の変数の探索にはより多くのパーティクルを要する。このように初期とそれ以降の探索に要するパーティクルの数が異なり、分散が大きくなる問題が発生したと考えられる。これは DHM のシルエットをマッチングする際にも発生すると考えられる。DHM の腕や脚の末端に近い関節ほど変数の組み合わせによる位置姿勢のパターンが増大する。これらの条件に対して適切なパーティクルの数を使用することで、より効率よく正確にマッチングが可能であると考えられる。

5. おわりに

本研究では、障害者の早期社会復帰を目的とした生活支援システムを研究している。本稿ではカメラ画像を用いた支援対象者の状態推定のコンセプトと、その手法およびカメラ画像を用いた計測対象の状態推定結果について報告した。今後は 3次元空間における立体の状態推定を実装する。

参考文献

- (1) 岩崎テル子, ほか, 作業療法評価学, 医学書院, (2011).
- (2) 比留川博久, "ロボット介護機器開発・導入促進プロジェクト", ロボット学会誌, Vol.34 No.4, pp.228-231, 2016.
- (3) 遠藤麻衣, ほか, "要介護者を支援するライフサポートシステム REACH -簡易音声認識による住環境操作支援の検証-", 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 2012, 1F4.2, 2013.
- (4) Brunnström, S., Movement therapy in hemiplegia: a neurophysiological approach, Facts and Comparisons, (1970).

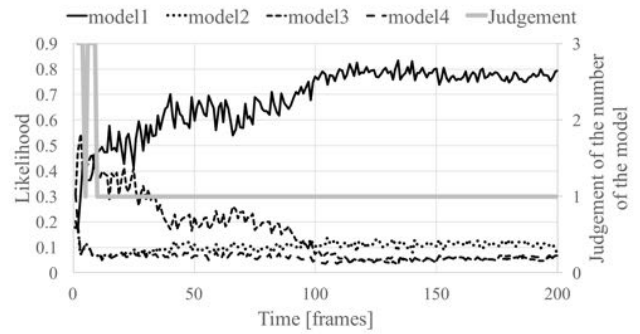


Fig.7 Matching results of the likelihoods and judgement

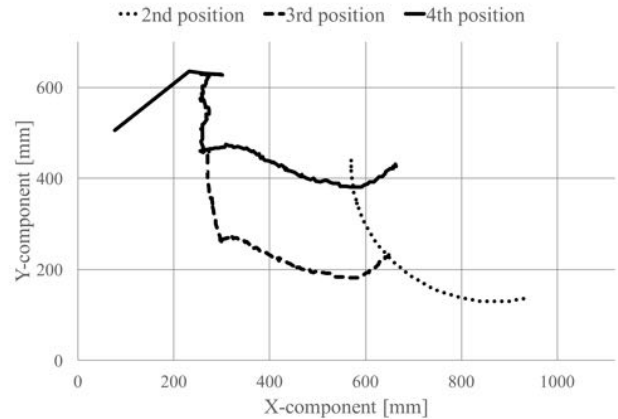


Fig.8 Tracking result of the position

- (5) 上田敏, 日常生活動作を再考する - 「出来る ADL」, 「している ADL」から「する ADL」へ-. リハビリテーション医学, Vol.30, No.8(1993), pp.539-549.
- (6) 諸根理仁, ほか, "複数 RGB-D センサを用いた障害者の状態推定システム-距離画像情報に基づく RGB-D センサの位置校正-. SI2015, 3B4-4, 2015.
- (7) 諸根理仁, ほか, "RGB-D センサを用いた片麻痺者のブルンストロームステージの推定", LIFE2014, 2014.
- (8) 諸根理仁, ほか, "複数台 RGB-D センサを用いた片麻痺者の状態推定システム -複数台 RGB-D センサ情報の統合-", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 1P1-01b2, 2016.
- (9) Sebastian Thrun, ほか, 確率ロボティクス, マイナビブックス, (2015).
- (10) Gary Bradski, ほか, 松田晃一訳, 詳解 OpenCV コンピュータライブラリを使った画像処理・認識, O'REILLY ジャパン, (2009).