

M推定を用いた三次元形状の咬合評価*

加納 政芳[†] 橋村 恭治[†] 加藤 昇平[†] 伊藤 英則[†]
[†] 名古屋工業大学

1 はじめに

義歯の製作過程において、歯科技工士は、患者の歯形を形取った石膏を元に咬み合せを調整して樹脂模型を作成し、そこから石膏型を起こしてアマルガムなどを鋳造する。しかしながら、この義歯樹脂模型の作成は、通常、手作業で行われるため、歯科技工士の高い技術が必要とされる。本研究では、咬み合せの調整回数を減らし義歯樹脂模型作成の時間的・技術的負担を軽減するために、患者の歯形を元にして計算機上で仮想的に義歯を設計するシステムの開発を行っている。本稿では、システムを構成する技術の1つである、咬み合せ状態を評価するための手法について提案する。

上下顎の歯列を咬み合せた場合、これらの歯列は密接しないため、計算機上で咬み合せ評価（以下、咬合評価）を行う際には口バストな評価方法が必要となる。そこで、本稿では、口バスト推定手法の一つである M 推定を用いた咬合評価手法を提案する。

2 データ測定

本研究では、入力データとしてレンジファインダによって測定された距離画像を与える。図1にデータ測定の概念図を、図2に測定により得られた距離画像を示す。データ測定時の解像度は4000(dot/meter)とした。また、本研究では、スリット光の照射方向を z 軸として取り扱う。このようにして計測された距離画像は、任意の x, y 座標値を持つ座標点は1点しか存在せず、一般に2.5次元画像と呼ばれる。

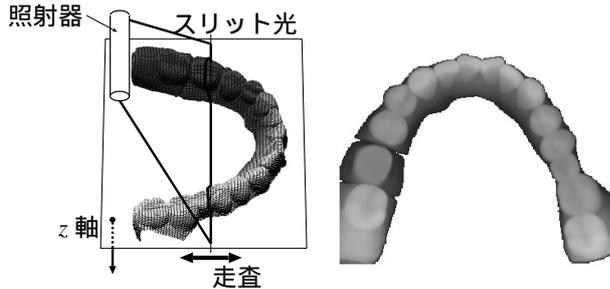


図 1: 計測方法

図 2: 濃淡画像

3 咬合評価

3.1 処理の概要

図3に咬合評価手法の概要を示す。まず、入力された濃淡画像（以下、歯列データ）の初期位置合せを行う。次に、歯列データから二次元濃淡画像を生成する。そして、生成された二次元濃淡画像を用いて咬合評価を行う。本手法では、下顎歯列データの位置を上顎歯列データに位置合せすることで咬合評価を行う。

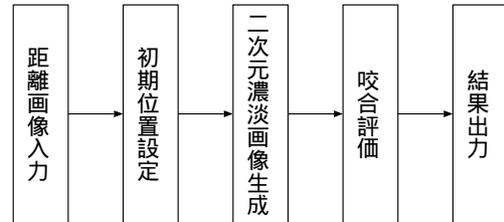


図 3: 処理の概要

3.2 初期位置設定

入力された歯列データの大まかな初期位置合せは、ユーザが下顎歯列データを移動させることで行う。このとき、初期位置として、上顎歯列データの最小 z 座標値を下顎歯列データの最大 z 座標値よりも大きくなるように与えるものとする。図6に初期位置例を示す。

3.3 咬合評価画像生成

2.5次元画像は、z 成分を濃淡値とした二次元濃淡画像として捉えることができる。本手法では、xy 平面上に座標点を投影することにより得られる二次元濃淡画像を用いて咬合評価を行う（図4）。

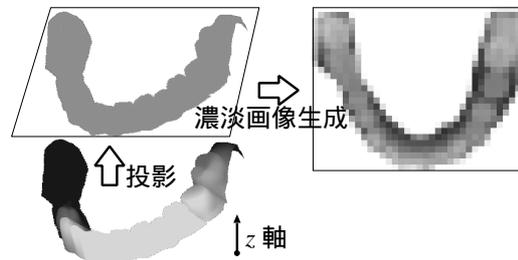


図 4: 濃淡画像生成の流れ（下顎）

定義 3.1 統合度 γ xy 平面上の広さ $\gamma \times \gamma$ の領域を一画素とする画像を、統合度 γ の画像と呼ぶ。 □

統合度の値が大きければ少ない画素数、すなわち低い解像度の画像が生成され、小さければ高い解像度の画像が生成される。統合度を用いることで任意の解像度を持つ画像を生成することができる。

定義 3.2 上顎歯列データ A の構成点を $(x, y, z)^T \in A$ とするとき、 A に対する 統合度 γ の濃淡画像 A^γ における画素 (i, j) の濃淡値は次のように定義される。

$$a_{i,j}^\gamma = \min_{(x,y,z)^T \in A} z, \quad (\gamma i \leq x < \gamma(i+1), \gamma j \leq y < \gamma(j+1)). \quad (1)$$

□

定義 3.3 回転行列 R により回転が加えられた下顎歯列データを B^R とする。 B^R の構成点を $(x, y, z)^T \in B^R$

* An Evaluation Method for Occlusion Using M-Estimator, Masayoshi KANOH[†], Koji HASHIMURA[†], Shohei KATO[†] and Hidenori ITOH[†].

[†] Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, Japan.

とするとき、 B^R に対する 統合度 γ の濃淡画像 $B^{R,\gamma}$ における画素 (i, j) の濃淡値は次のように定義される。

$$b_{i,j}^{R,\gamma} = \max_{(x,y,z)^T \in B^R} z, \quad (\gamma i \leq x < \gamma(i+1), \gamma j \leq y < \gamma(j+1)). \quad (2)$$

□

3.4 M 推定を用いた咬合評価

本手法では、咬合評価の前処理として評価に必要な領域の抽出は行われていないため、歯列データ全体が評価対象となる。上下顎の濃淡画像を用いて咬合評価を行うとき、歯茎や歯側面部の濃淡値は大きく異なっているため、これらの部位の評価値は例外値として観測される。そのため、咬合評価に最小二乗法を用いた場合には、得られる評価値は例外値に影響された信頼性の低いものとなる。そこで、M 推定を用いて歯茎部などで発散する誤差を途中で飽和させることでロバストな咬合評価を行うことを提案する。

定義 3.4 統合度 γ の上下顎濃淡画像対 $(A^\gamma, B^{R,\gamma})$ に対して、 $B^{R,\gamma}$ のピクセル位置を $t = (u, v)$ だけ移動させて咬合評価を行うとき、画素 (i, j) における濃淡差は次のように表される。

$$\varepsilon_{i,j}^{R,\gamma,t} = a_{i,j}^\gamma - b_{i+u,j+v}^{R,\gamma}. \quad (3)$$

A^γ と t だけピクセル位置を移動した B^γ に対する M 推定量は次のように定義される。

$$\mathcal{E}(R, \gamma, t) = \sum_i \sum_j \rho(\varepsilon_{i,j}^{R,\gamma,t} - \varepsilon_{\min}^{R,\gamma,t}, \sigma), \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\min}^{R,\gamma,t} = \min_{k,l} \varepsilon_{k,l}^{R,\gamma,t}.$$

ここで、 σ は制御パラメータ、 ρ は M 推定量関数である。
□

M 推定量関数としては、誤差を途中で飽和させるために Geman と McClure の ρ 関数^[1]を用いる。

$$\rho(x, \sigma) = \frac{x^2}{\sigma + x^2}. \quad (5)$$

3.5 多重解像度を用いた高速化

濃淡画像を利用した咬合評価法を用いても、画像の統合度が小さくなるにつれて、最適な評価値 \mathcal{E} を与える R, t を求めるための計算量は増加する。そこで、本稿では、多重解像度表現を用いることで、準最適な咬合位置を少ない計算量で特定するアルゴリズムを提案する。

本アルゴリズムは、統合度を動的に変化させることで異なる解像度の画像を生成し、探索の精度を制御する。

定義 3.5 x, y, z 軸周りに θ の回転移動を与える行列をそれぞれ、 $X_\theta, Y_\theta, Z_\theta$ とする。基準となる移動量 R, t が与えられたとき、統合度 γ における探索空間 S を次のように定義する。

$$S = \{(RX_{\delta_x \gamma \theta_x} Y_{\delta_y \gamma \theta_y} Z_{\delta_z \gamma \theta_z}, t + (\delta_i, \delta_j)) \mid -n \leq \delta_x \leq n, -n \leq \delta_y \leq n, -n \leq \delta_z \leq n, -m \leq \delta_i \leq m, -m \leq \delta_j \leq m\}. \quad (6)$$

ここで、 n, m は探索空間の広さを決定するパラメータであり、 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ は、 x, y, z 軸周りの単位回転量である。
□

図 5 に多重解像度を用いたアルゴリズムを示す。

多重解像度を用いた咬合位置特定

入力 : 上下顎の歯列データ A, B

出力 : 下顎移動量 (R, t)

```

1 begin
2    $R := I$ ;
3   統合度 $\gamma$ を初期化する。
4    $t$ を歯列データの初期状態と $\gamma$ から決定する。
5   repeat
6     基準移動量を  $(R, t)$  として探索空間  $S$  を作成する。
7      $(R', t') := \arg \min_{(R', t') \in S} \mathcal{E}(R', t', \gamma)$ 
8     現在の $\gamma$ と一段階下の $\gamma$ との比を用いて  $t$  を補正する。
9      $\gamma$ を一段階下げる。
10  until ( $\gamma$ が最小統合度でない)
11 end.
```

図 5: 位置特定アルゴリズム

4 評価実験

各パラメータを $\gamma = \{0.9, 0.6, 0.3\}$, $\sigma = 9.4$, $n = 2$, $m = 1$, $\theta_x = \theta_y = \theta_z = \pi/30$ として実験を行った。初期状態として図 6 の状態を与えて咬合位置を特定した結果を図 7 に示す。このときの実行時間は約 30 秒であった (Pentium III 500MHz)。また、図 7 のときの咬合状態を濃淡画像として表したものを図 8 に示す。(a) は、咬合までの距離が 0~1.0mm の部分を濃淡で示しており、黒くなるにつれて距離が近いことを表す。また、(b),(c),(d) は、咬合までの距離がそれぞれ 0~0.3mm, 0~0.6mm, 0~0.9mm の部分を黒で示している。

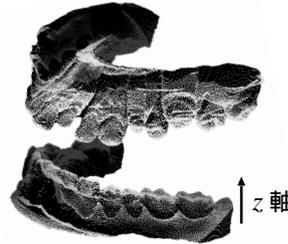


図 6: 初期状態



図 7: 最終状態

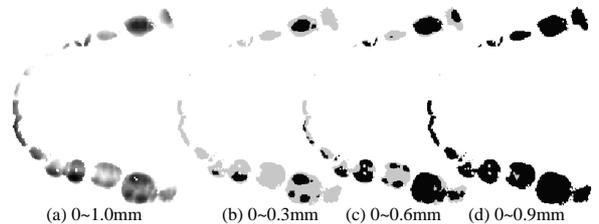


図 8: 咬合状態

5 おわりに

本稿では、ロバスト推定手法の一つである M 推定を用いた咬合評価手法を提案した。今後は、計算機上で仮想的に義歯の設計を行う手法について検討する。

参考文献

- [1] Black, M. J. and Anandan, P., The Robust Estimation of Multiple Motions: Parametric and Piecewise-Smooth Flow Fields, CVIU, 63(1), pp. 75-104, 1996.