

ハイブリッド相同モデルによる result-oriented な 顎顔面手術シミュレーション法の開発

九州大学大学院歯学研究院口腔顎顔面病態学講座口腔顎顔面外科学分野

山田 朋弘

A homologous model that converts the surface shape of a living body consisting of a huge point cloud into a small number of parameters (principal component vectors) reflecting anatomical features. In this study, homologous model was applied to the morphology of the facial surface and jawbone and was used in the simulation of oral and maxillofacial surgery, especially jaw deformity (orthognathic) surgery. From the aimed facial form assumed in advance, we tried to make a prediction model for hard tissue surgery for each patient.

Prior to model creation, the reproducibility of anatomical landmarks of facial soft tissue was verified. The subjects were 10 healthy adults. When reproducibility was examined using ICC (intra-class correlation coefficients), 11 reliable landmarks were confirmed.

Based on the CT data of a healthy person (TY), a homology model of hard and soft tissues with 3187 vertices was created as a hybrid homologous model. Using this as a template, a hybrid homologous model of jaw deformity patients with facial asymmetry was created.

The difference between the hard tissue morphology predicted from the amount of change in the jawbone calculated from the aimed facial form of the soft tissue, and the actual post-operative hard tissue morphology had a difference of approximately 5 mm in the mandibular ramus and the lateral part of the chin, which remains asymmetry after the operation.

The result-oriented hard tissue simulation for orthognathic surgery obtained from the aimed soft tissue morphology was useful for planning surgery and discussing postoperative problems.

1. 緒 言

顎変形症をはじめとする顎顔面手術では、治療目的が咬合の改善による咀嚼力の向上や歯周組織の健全化であることが多い。しかしながら、副次的な目的の一つにバランスのとれた顔貌がある。ところが実臨床では、予定通りの咬合が得られても必ずしも顔貌の満足度が高くない症例が存在する。特に顔面非対称症例の場合、咬合の緊密化が輪郭の対称性に合致しない場合も散見される。

これまで顎変形症などの治療に用いられていたシミュレーション法では顎骨の移動量を決めてから骨片の干渉部位や骨形態を予測するのみであり、望ましい顔貌が得られるか否かは明確にすることができなかった¹⁾。そこで、事前に理想(目標)顔貌を予測し、軟組織の移動量を逆算して骨の移動様式をシミュレーションする方法に着目した。理想的な軟組織形態の獲得を優先させた手術シミュレーションが可能になれば、治療計画立案のツールに新たな選択肢が加わり、より満足度の高い治療が可能になることが期待される。本研究では、ハイブリッド相同モデルを応用し、result-oriented な手術シミュレーション法を開発することを目的とする。

2. 方 法

2. 1. 相同モデル化技術に必要な解剖学的ランドマークの確立

ビデオカメラや立体カメラなどで取得できる立体データは、ポリゴンと呼ばれる三角形の集合体でできており、各立体データによってポリゴン数にばらつきがあるため、統計処理をすることが困難である。そこで各立体データに対して、ポリゴン数を決めた共通のテンプレートデータを、設定した解剖学的ランドマークに一致させながら各立体データに貼り付けることにより、すべての立体データのポリゴン数が一致したモデルを作製する技術を相同モデル化技術と呼ぶ²⁻⁴⁾(図1)。この結果できたモデル(=相同モデル)を用いることで多変量解析などの統計処理ができ、解剖学的ランドマークの設定が困難な部位でも形態評価が可能となる。

顔面軟組織の立体(3D)データを相同モデル化するためには、解剖学的ランドマークの設定が重要となる⁵⁾。そこで、まず再現性の高い解剖学的ランドマークを明らかにすることを目的とした。

対象は2016年4月から2017年3月までに九州大学歯学部部に所属した日本国籍の学生のうち男性5人、女性5人の計10人(平均年齢 23.6 ± 1.2 歳)を対象とした。対象は先天性疾患、顎顔面外傷の既往および顎矯正手術の治療歴がある学生を除外した。

3D画像撮影解析装置(VECTRA® H1, Canfield Scientific, Parsippany, NJ)を用いて3つのアングルで被検者の顔を撮影し、得られた画像データを3Dデータ構築ソフト(VECTRA Capture Module, Canfield)で画像を三



Result-oriented simulation for maxillofacial surgery using homologous modelling

Tomohiro Yamada

Section of Oral and Maxillofacial Surgery,
Division of Maxillofacial Diagnostic and
Surgical Sciences, Faculty of Dental
Science, Kyushu University

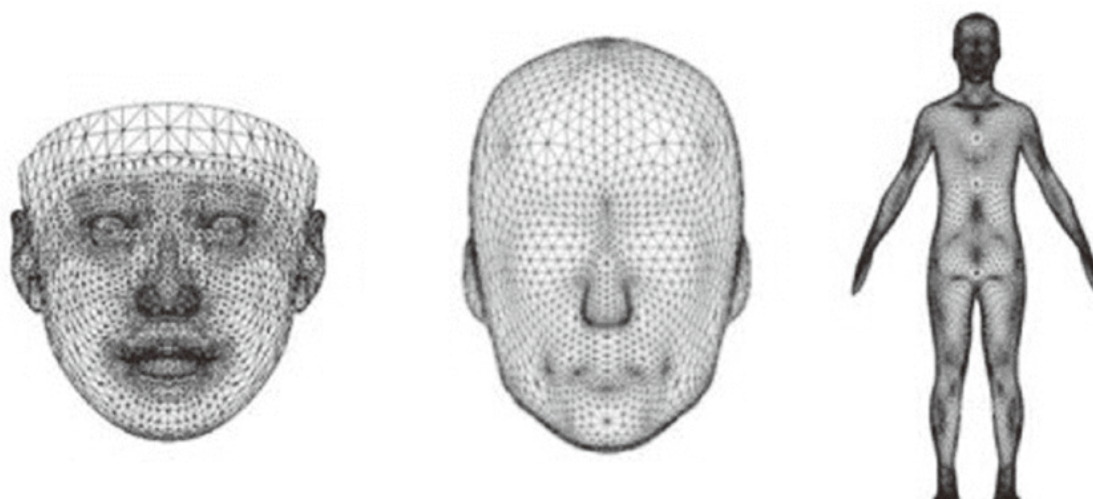


図1 相同モデルの定義

次元構築し、医療画像キャプチャソフトウェア (Mirror[®] PhotoFile[®], Canfield) を用いて STL (Stereo lithographic) 形式に変換して顔面データとして保存した。得られた顔面データを相同モデル支援ソフトウェア (HBM-Rugle, メディックエンジニアリング, 京都) に転送し、顔面データ上に、過去の文献を参考にし、以下に示す解剖学的ランドマーク計 26 点 (うち左右対称となるランドマークは 9 対 18 点) を計測点としてプロットした (図 2)。

プロットする計測者は同一人物とし、それぞれ 1 週間以上の間隔を空けて計 3 回プロットした。1 回目と 2 回目、2 回目と 3 回目、1 回目と 3 回目それぞれにおける点間距離を測定して同一解剖学的ランドマーク内で比較し、再現性を検討した。計測点の再現性の統計学的検定には ICC (級内相関係数、intraclass correlation coefficients) を採用した。左右対称となるランドマーク 9 対 18 点については、左右それぞれにおける同一試行回における点間距離の平均値を算出して 1 対ごとに計測点の再現性を検討した。統計解析は JMP[®] (SAS Intsitute Inc. Cary, NC) を用いた。

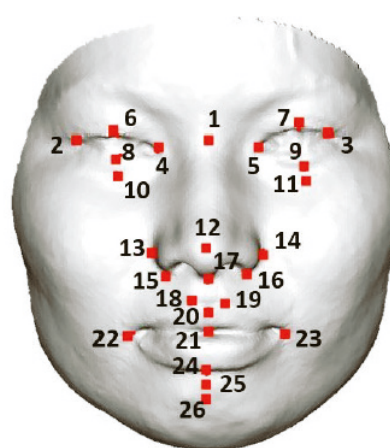


図2 検証した解剖学的ランドマーク

2. 2. ハイブリッド相同モデルの作製

CT 撮影は九州大学病院放射線撮影室内に設置している Aquilion (キャノンメディカルシステムズ、大田原) を使用した。撮影は患者を仰臥位で閉口させ、管電圧 120kV、管電流 100mA の条件で行った。撮影範囲は、眼窩上孔から舌骨までの範囲で、眼窩中央より下 3cm の範囲では、スライス厚 2mm、テーブル移動速度 3mm/sec で撮影した。顎関節部ではスライス厚 1mm、テーブル移動速度 1.5mm/sec、オトガイ付近ではスライス厚 2mm、テーブル移動速度 3mm/sec で撮影した。基準平面は フランクフルト (FH) 平面を用い、それに平行な断面で計測した。

健康人の被験者 1 名 (著者) の撮影から得られた DICOM データを Mimics (Materialise, Leuven, Belgium) で 3 次元

構築し、3Matics (Materialise) で STL ファイルに変換した。軟組織表面と顔面骨組織のそれぞれで STL ファイルを作成し HBM-Rugle で頂点数を 3187 まで間引いてテンプレートとした (図 3)。

2. 3. 顔面非対称患者の術後硬組織形態のシミュレーション

相同モデルは頂点同士が対応を持っているため、差分ベクトルを作ることができる。硬組織と軟組織の対応がとれたハイブリッド相同モデルを用いることで、なんらかの方法で術後軟組織の相同モデルが作成できれば、術前後軟組織の差分ベクトルを術前硬組織の相同モデルに加算することにより術後硬組織の予測モデルが作成できる (図 4)。

3. 結果

3. 1. 相同モデル化技術に必要な解剖学的ランドマークの確立

ICC における再現性は $0.40 < ICC \leq 0.60$ を “moderate”、

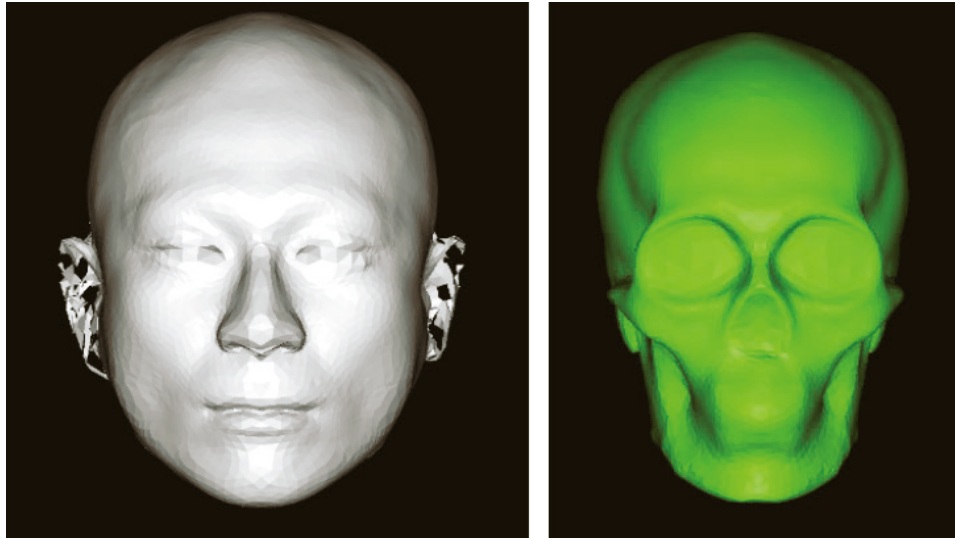


図3 ハイブリッド相同モデルのテンプレート

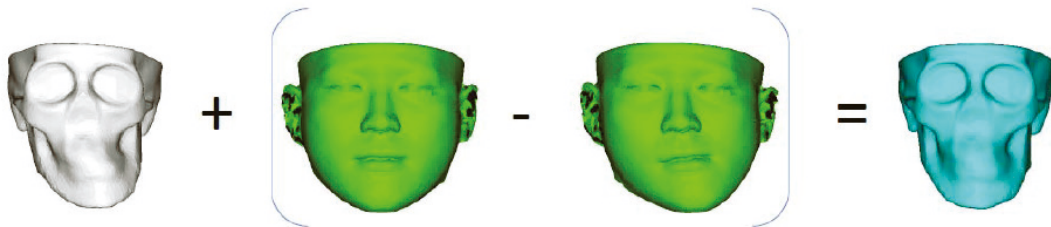


図4 ハイブリッド相同モデルによる硬組織形態の決定

0.60 < ICC ≤ 0.80 を “substantial”、ICC ≥ 0.80 を “almost perfect” とし、“almost perfect” を再現性が高いランドマークとした。本検証にて、N, Ps-R, Ps-L, Ac-R, Ac-L, Sn, Cph-R, Cph-L, St, Li, Srn は “almost perfect”、Pi-R, Pi-L, Prn, Ch-R, Ch-L, Po は “substantial” であった(表 1)。

以降の研究において、相同モデル化するための解剖学的ランドマークを “almost perfect” と判定された①' N, ②' Ps-R, ③' Ps-L, ④' Ac-R, ⑤' Ac-L, ⑥' Sn, ⑦' Cph-R, ⑧' Cph-L, ⑨' St, ⑩' Li, ⑪' Srn の 11 点とすることにした(図 5)。

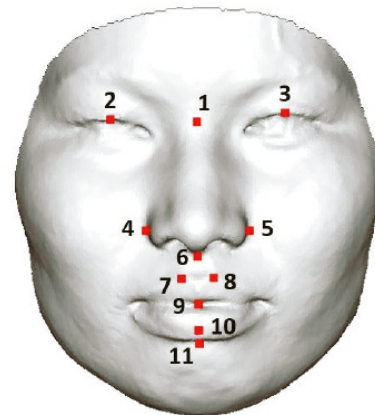


図5 相同モデル化に使用する解剖学的ランドマーク

3. 2. 目標軟組織形態からの硬組織シミュレーションモデルと術後形態の比較

顔面非対称患者に対する従来の方法(目標の咬合から上下顎骨の移動量を算出)で手術計画をたて、実際に手術を行った(図 6)術後患者において、目標顔貌から硬組織予測形態を作製した(図 7)。この、予測顎骨形態と実際の術後顎骨形態の差を面間距離としてカラーマッピング表示した(図 8)ところ、上顎骨、下顎角部、オトガイ部側方で差が大きいことが明らかとなった。このことは同部位において、軟組織形態の改善に重点をおくと、骨の移動量が不足していたことを示す。

4. 考 察

顎顔面の形成手術、特に顎変形症の手術において、顎骨

形成の指標はほとんど歯列が中心であり、咬合や咀嚼機能の改善に重点がおかれている。それは医療として当然あるべき姿であると思われるが、機能と形態は一对のものであるもののどちらかが不完全な状態をとらざるを得ない状況も存在する。その代表的な例が顔面非対称を伴う顎変形症の治療であり、術後の顔面軟組織の形態に関しては正確な予測は困難である。現在の実臨床では、顔貌の予測は側貌の一方向に限られることがほとんどであり、非対称症例に関しては十分な予測はできていないのが現状である。海外においては、いくつかのシミュレーション方法が開発され、市販されているものもあるが、いずれも骨の移動量をまず

表1 各解剖学的ランドマークの再現性の検証結果

番号	解剖学的 ランドマーク	点間距離 (mm)			ICC	再現性
		1 st - 2 nd	1 st - 3 rd	2 nd - 3 rd		
1	N	0.20 ± 0.09	0.24 ± 0.15	0.26 ± 0.12	1.00	a.p.
2	Ex-R	1.06 ± 0.09	1.36 ± 0.67	0.72 ± 0.46	0.54	m
3	Ex-L	1.16 ± 1.19	1.48 ± 1.17	0.52 ± 0.26		
4	En-R	0.58 ± 0.30	1.38 ± 0.70	1.43 ± 0.84	0.51	m
5	En-L	0.43 ± 0.31	1.52 ± 0.59	1.92 ± 0.55		
6	Ps-R	0.97 ± 0.60	1.11 ± 0.72	0.96 ± 0.48	0.99	a.p.
7	Ps-L	0.94 ± 0.41	1.29 ± 0.97	1.00 ± 0.75		
8	Pi-R	0.94 ± 0.53	1.09 ± 0.84	1.07 ± 0.83	0.76	s
9	Pi-L	0.84 ± 0.47	1.65 ± 0.67	1.29 ± 0.78		
10	Or-R	2.21 ± 1.21	1.73 ± 1.25	1.28 ± 0.94	0.53	m
11	Or-L	1.91 ± 1.37	2.05 ± 1.35	0.86 ± 0.56		
12	Prn	0.36 ± 0.21	0.61 ± 0.40	0.60 ± 0.23	0.77	s
13	Ac-R	0.75 ± 0.31	0.76 ± 0.47	0.76 ± 0.47	1.00	a.p.
14	Ac-L	0.79 ± 0.53	1.00 ± 0.43	0.97 ± 0.36		
15	Sbal-R	0.71 ± 0.28	0.70 ± 0.49	0.90 ± 0.41	0.56	m
16	Sbal-L	0.78 ± 0.46	0.69 ± 0.43	1.11 ± 0.56		
17	Sn	0.62 ± 0.39	0.61 ± 0.73	0.50 ± 0.49	1.00	a.p.
18	Cph-R	0.57 ± 0.31	0.82 ± 0.27	0.69 ± 0.32	1.00	a.p.
19	Cph-L	0.86 ± 0.50	0.88 ± 0.76	0.90 ± 0.36		
20	Ls	0.60 ± 0.24	0.54 ± 0.22	0.39 ± 0.27	0.56	m
21	St	0.42 ± 0.15	0.46 ± 0.26	0.43 ± 0.21	1.00	a.p.
22	Ch-R	0.57 ± 0.28	1.38 ± 1.56	1.28 ± 1.45	0.68	s
23	Ch-L	0.74 ± 0.41	1.50 ± 0.82	1.51 ± 0.85		
24	Li	0.56 ± 0.36	0.70 ± 0.43	0.89 ± 0.50	0.82	a.p.
25	Srn	1.58 ± 1.81	1.25 ± 0.78	1.80 ± 1.75	1.00	a.p.
26	Pog	1.56 ± 1.00	1.90 ± 0.69	2.20 ± 0.99	0.76	s

m : "moderate" (0.40 < ICC ≤ 0.60), s : "substantial" (0.60 < ICC ≤ 0.80), a.p. : "almost perfect" (ICC ≥ 0.80)

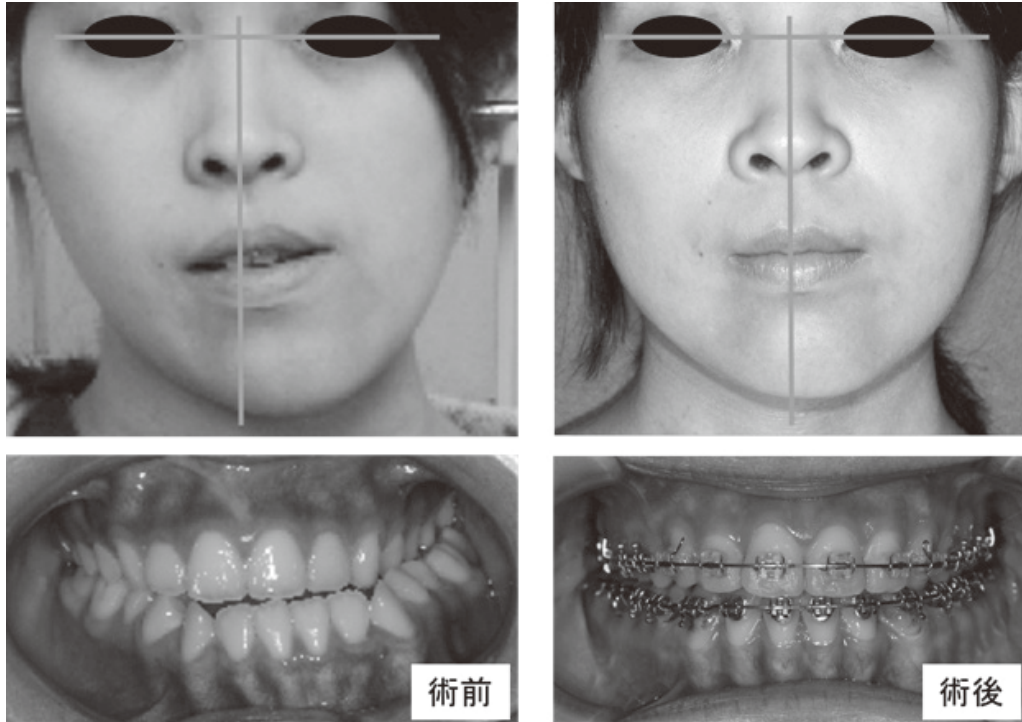


図6 目標の咬合から顎骨の移動計画をたて手術を行った顔面非対称症例の術前後

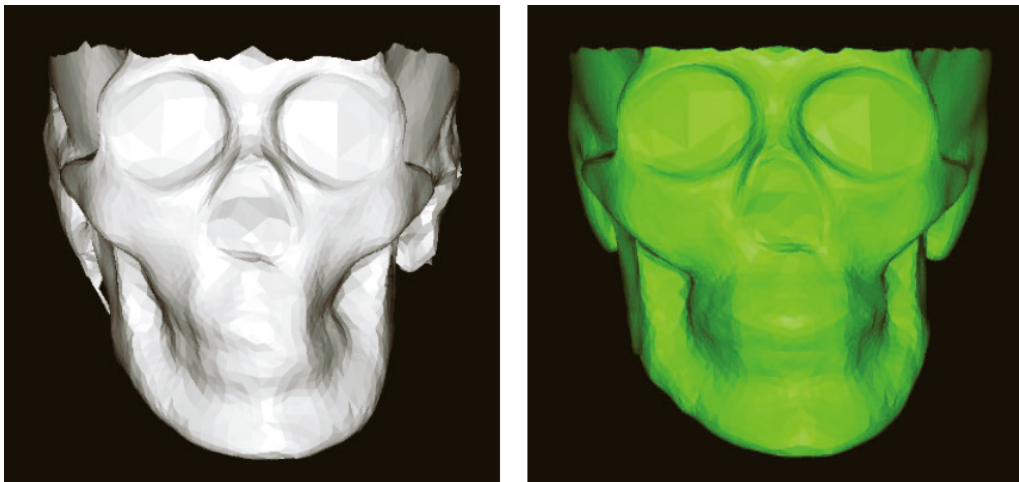


図7 シミュレーションモデルと実際の術後形態

決定し、それに追従する軟組織の移動を予測するものである¹⁾。従って、軟組織の最終的なresultを出発点とした骨組織の移動様式を計画することは不可能であった。

近年、生体の表面形状を相同モデル化する手法が開発され、膨大な点群からなる解剖学的特徴を反映した少数のパラメータ(主成分ベクトル)に変換することにより、これまで不可能であった生体三次元形状の統計的解析ができるようになった²⁻⁷⁾。われわれは、この相同モデル化技術を顎顔面の形態解析に応用し、下顎骨を相同モデル化することにより彎曲を含めた骨形態の定量化を可能にした⁸⁾。さらに、顔面表面データの相同モデル化により、これまで特徴点の取りづらい曲面を中心とした顔面形態を統計的に扱え

るようになった⁹⁾。

本研究で用いる相同モデル化技術は日本で開発されたものの((独)産業技術総合研究所)であり、外国での医療目的の研究はほとんどない。近年、法医学分野において、この相同モデルが復顔に用いられつつあるが、軟組織の必要移動量から硬組織(顎骨)の移動様式をシミュレーションすることは、まさに復顔と逆の工程であり、復顔手法を応用した術後シミュレーション法を考案した。医療分野での類似の試みはほとんどなく、この日本発の相同モデリング技術を応用した手術シミュレーションは独創的な研究と思われる。これまで人体形状の相同モデルを医学研究、特に手術計画や評価に応用した研究はほとんどなく、医学分野への波及

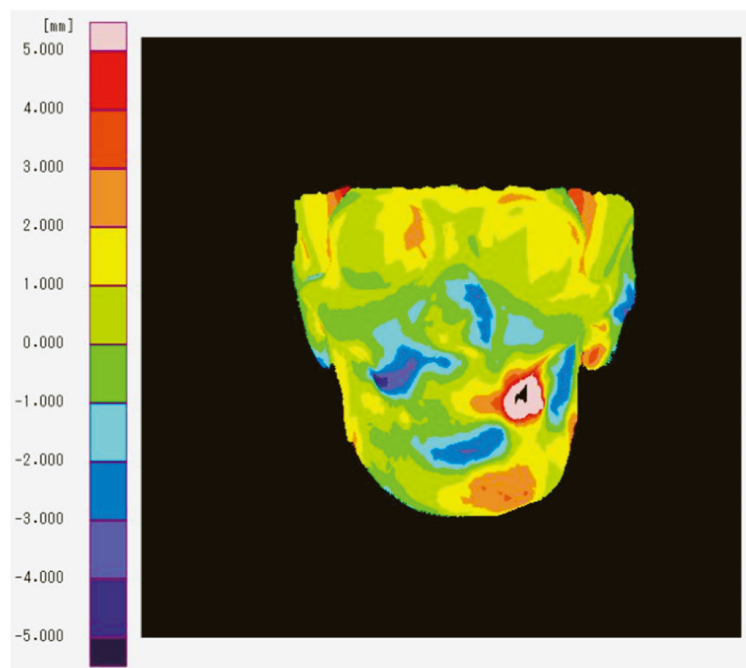


図8 シミュレーションと実際の術後形態の差

効果としては、本手法により顎変形症のみならず口腔・顎顔面の腫瘍切除や再建手術の治療シミュレーションへの応用が期待される。これにより、より予知性の高い手術的治療が可能になると思われる。

将来的な波及効果としては、相同モデルでは解剖学的特徴がデータ点に反映されるため、アニメーションなど、動画作成への応用が期待される。また、顔面形状の経年的変化によるデータを蓄積すれば加齢による顔貌予測も可能となる。このことから、アンチエイジングやコスメトロジー分野においても多大な成果が期待できるものと考えられる。今後は、顔面軟組織と骨組織の対応関係を蓄積し、より正確なシミュレーションができるように研究を進め、日常の臨床での使用につなげたいと考えている。

(引用文献)

- 1) Moehlhenrich SC, Heussen N, Kamal M, Peters F, Fritz U, Hoelzle F, Modabber A. Influence of setback and advancement osseous genioplasty on facial outcome: A computer-simulated study. *J Craniomaxillofac Surg* 43 (10), 2017-2025, 2017.
- 2) Mochimaru M, Kouchi M. Statistics for 3D human body forms. *SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference* 2000-01-2149, 2002.
- 3) Kouchi M, Mochimaru M. Inter-individual variations in intra-individual shape change patterns. *SAE Digital Human Modeling for Design and Engineering Conference* 2006-01-2353, 2006.
- 4) Kouchi M, Mochimaru M. Simulation of the body shape after weight change for health-care services. *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics* 217-222, 2010.
- 5) Allen B, Curless, Popovic Z. Brian The space of human body shapes: reconstruction and parametrization from range scans. *ACM T GRAPHIC* 22 (3): 587-594, 2003.
- 6) Kato A, Kouchi M, Mochimaru M, Isomura A, Ohno N. A geometric morphometric analysis of the crown form of maxillary central incisor in humans. *Dental Anthropology* 24 (1), 1-10, 2011.
- 7) Matsuoka A, Yoshioka F, Ozawa S, Takebe J. Development of three-dimensional facial expression models using morphing methods for fabricating facial prostheses. *J Prosthodont Res* 63: 66-72 2019.
- 8) Inoue K, Nakano H, Sumida T, Yamada T, Otawa N, Fukuda N, Nakajima Y, Kumamaru W, Mishima K, Kouchi M, Takahashi I, Mori Y. A novel measurement method for the morphology of the mandibular ramus using homologous modeling. *Dentomaxillofac Radiol* 44: 20150062.
- 9) Yasuda K, Nakano H, Yamada T, Albougha S, Inoue K, Nakashima A, Kamata Y, Sugiyama G, Tajiri S, Sumida T, Mishima K, Mori Y. Identifying differences between a straight face and a posed smile using the homologous modeling technique and the principal component analysis. *J Craniofac Surg* 30 (8): 2378-2380, 2019.