

矯正歯科治療後の三次元顔形態を予測する人工知能 (AI) システムの開発

谷川 千尋 (大阪大学)

概要

近年、人工知能 (AI) の技術研究開発が進み、医療分野においても、過去のデータベースから様々な推論が可能となりつつある。現在、矯正歯科治療の分野では治療前後の三次元顔画像の蓄積が行われているが、大量の情報を有するためにその情報の活用が進んでいないのが現状である。我々の研究チームは、これまでに医療課題への AI 技術の応用を進め、三次元形態を効率よく表現した相同モデルの活用が AI 技術の応用に有用であることを確認してきた。そこで、本課題では、AI 技術と相同モデル化を組み合わせて三次元画像に解析することで、これまで不可能であった「矯正歯科治療前の情報から治療後の三次元顔形態を予測する」システム (以下、三次元顔予測 AI) の開発を行った。また、三次元顔予測 AI の入力情報として必要なレントゲン画像の自動認識システム (以下、セファロ自動認識 AI) の開発についても同時に取り組んだ。これにより、過去に困難であった治療前の情報から治療後の顔の三次元形態を視覚化して患者に提供することが可能となり、客観的な証拠に基づいた医療および個々の患者に特化した医療の提供が可能となった。

1 共同研究に関する情報

1.1 共同研究を実施した拠点名

大阪大学

1.2 共同研究分野

■ 超大規模数値計算系応用分野

1.3 参加研究者の役割分担

- Lee Chonho : システムに関する助言
- 清水優仁 : システム構築
- 山城 隆 : システムに関する助言

2 研究の目的と意義

顔の軟組織の形態を改善することは、矯正歯科治療においては社会心理学的な立場から、重要な治療目標のひとつである。しかし、顔の軟

組織の形態予測を行う機能をもつとされる市販のソフトウェアで用いられているアルゴリズムの多くは、硬組織と軟組織の移動量が比例関係を有するとの誤った前提に立つものであり、また、比例定数値の指定は術者に依存するなど、予測結果の正当性に関する根拠は乏しい。これまで、上下切歯の後方移動によるわずかな顔面の立体形状の変化を高精度で予測するシステムはなかった (図 1)。一方、これまでに我々の研究室は、側貌 (二次元) を定量的に評価し、数学的に分類する手法を開発し、報告している。この手法は、専門家の知識に基づいて計測値 (特徴変数) を抽出し、抽出された計測値を多変数として同時に扱うことを特徴としている。同手法を用いることで、専門家が注目する僅かな形態の差異を最大化した上で、日本人女性の口



図1 過去の問題点

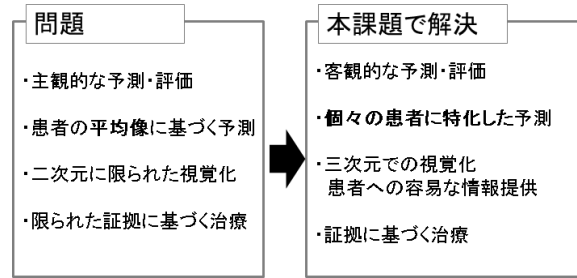


図2 研究の概要

唇と鼻を分類することに成功した。また、口唇口蓋裂を有する患者を対象として、同手法を三次元の顔画像に適用し、安静時の口唇部形態を三次元的に計測し客観的に分類するシステムを開発した。臨床現場における診断や治療計画立案では、過去の症例の診断や治療計画、さらにその治療成績を参照しながら、専門医の長年の“経験”により判断を行っている。我々は、これら専門医の長年の“経験”を実装するようなシステムを数値演算処理として行う方法についても過去に提案してきた。そこで、本研究では、上記の研究を発展させ、抜歯に伴う矯正歯科治療後の患者の三次元の顔形態を、過去の症例に照らし合わせて数値演算処理により予測するシステムを構築し、その精度を検証する事を目的とした(図2)。ひとの顔は相互の社会的コミュニケーションを適切に行う上で重要な機能を果たしている。顎顔面部の形成異常や顎変形症に由来する顔の形態的な歪みがある場合、個人にとって重大な社会心理学的な不適應という問題を引き起こすことが考えられる。現代の矯正歯科治療においては社会心理学的な立場から、顔の軟組織の形態を改善することは、重要な治療目標のひとつとみなされている。不正咬合を有する患者の治療計画を立てる場合には、抜歯か非抜歯のいずれが治療方法として適切か、またカムフラージュ治療か外科手術を伴う治療のい

ずれが治療方法として適切かを判断する上で、軟組織顔の形を評価し、その情報を従来の診断資料に組み込んで治療予測を行うことは不可欠である。顔の軟組織の形態予測を行う機能をもつとされる市販のソフトウェアで用いられているアルゴリズムも、二次元での可視化を行うものであり、さらにそのアルゴリズムの多くは、硬組織と軟組織の移動量が比例関係を有するとの誤った前提に立つものである。治療後の顔の形を、AI技術を応用して客観的に予測し、三次元にて視覚化することが可能になれば、個々の患者に特化した‘証拠に基づく’高品質な医療を提供する上で大きな意義を有する。

3 当拠点公募型研究として実施した意義

三次元画像データはデータ量が大きく、PCで計算することは困難である。また、過去のデータベースから学習を行うためには、大規模数値計算が必要である。当拠点公募型研究として本研究を実施したことにより、大阪大学サイバーメディアセンターの保有・提供する大規模計算機システムおよび大規模可視化システムが接続された高性能計算環境(OCTOPUS (Osaka university Cybermedia cenTer Over-Petascale Universal Supercomputer))を用いることができ、これにより、三次元データを含む過去のデータベースからの学習が可能となっ

た。したがって、当研究公募型研究として実施した意義がある。

4 今年度の研究成果の詳細

システムは大きく分けて、1) セファロ自動認識AI, 2) 三次元顔予測AIの二つからなる。

4.1 セファロ自動認識AIシステムの開発

4.1.1 目的

三次元画像の予測を行うために必要なレントゲン画像の自動認識を行うシステムを構築することにある。

4.1.2 方法

大阪大学歯学部附属病院矯正科にて撮影された側面位頭部レントゲン規格画像（以下、セファロ）935枚を用いた。22の硬組織ランドマークと11の軟組織ランドマーク（図3）について、一人の矯正科医が正解座標の位置を指定することで、学習に使用する正解データセットを生成した。様々な大きさと形態からなるマルチスケール画像を用いてシステムの学習を行った。計算方法の概要を（図4）に示す。本システムの特徴としては、ランドマークごとに決定したマルチスケール画像を含む学習用データを用いたこと（図5）、ランドマーク分類のためのCNNと座標推定のためのCNNを用いたこと（図6）にある。システムの評価を行うために、(i) 正解座標とシステムが推定した座標値の間のユークリッド距離で表現される誤差、および(ii) 推定楕円によって表現された正解範囲内にシステムの推定座標が含まれる場合を成功とした場合の成功率を計算した。

4.1.3 結果

硬組織ランドマークについての平均誤差は、1.32~3.5mmであり、平均成功率は96.4%であった。軟組織ランドマークについての平均誤差は1.16~4.37mm、平均成功率は75.2%で

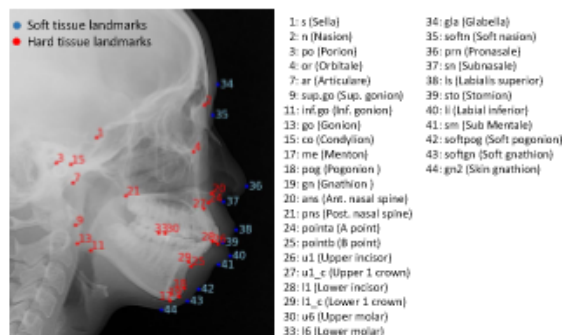


図3 使用したランドマーク

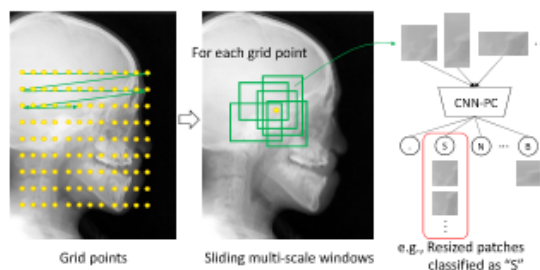


図4 ランドマーク認識の流れ

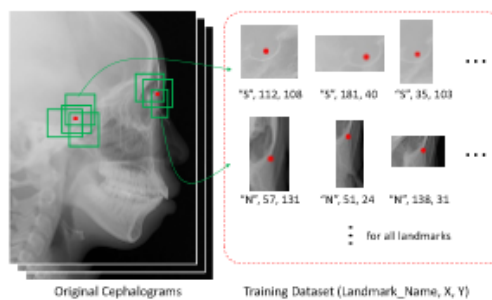


図5 マルチスケールの画像を含む学習用データセットの例

あった。

4.2 三次元顔予測AIシステムの開発

4.2.1 目的

抜歯に伴う矯正歯科治療後の顔の形予測するAIシステムを開発し、その予測精度を評価することにある。

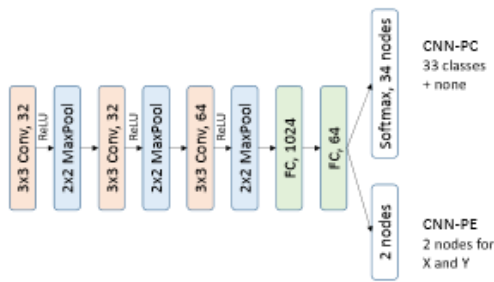


図 6 ランドマーク分類のための CNN と座標値推定のための CNN

4.2.2 方法

■資料の収集 抜歯を伴う矯正歯科治療を行った女性患者 55 名の治療前後の三次元顔面画像およびセファロ画像を資料として、顔面を構成する座標値群と解剖学的特徴点の位置情報を蓄積した。座標系 (図 7) を過去の報告に基づいて決定した後、すべての三次元顔面画像に対し、顔の相同モデル Fpre, Fpost 系 (図 8) を HBM-Rugle (メディック社, 京都) を用いて生成し、顔の治療による形態変化を表すベクトル群 C を抽出した。ベクトル群 C の性質を検討するために、距離マップと有意差マップを用いて、術前術後にかけての軟組織変化を評価した系 (図 9)。次に、セファロ画像より顎顔面形態を表す特徴ベクトル P を抽出した。

■システムの構築 新たに入力された特徴ベクトル [Fpre, P] から C を算出する回帰モデルを、深層学習を用いて生成した。回帰モデルにより算出された C を治療前の顔の相同モデル Fpre(new) に加算することで、治療前の三次元顔面形態から治療後の三次元顔面形態 Fpost(new) を予測するシステムを構築した (図 10)。

■システムの性能評価 システム性能を検討するために、11 分割交差検証をおこない、システムを用いて予測された顔面表面と実際の治療後の顔面表面の絶対距離を誤差と定義した場合の平均を図 11 の方法を用いて算出し、予測精度

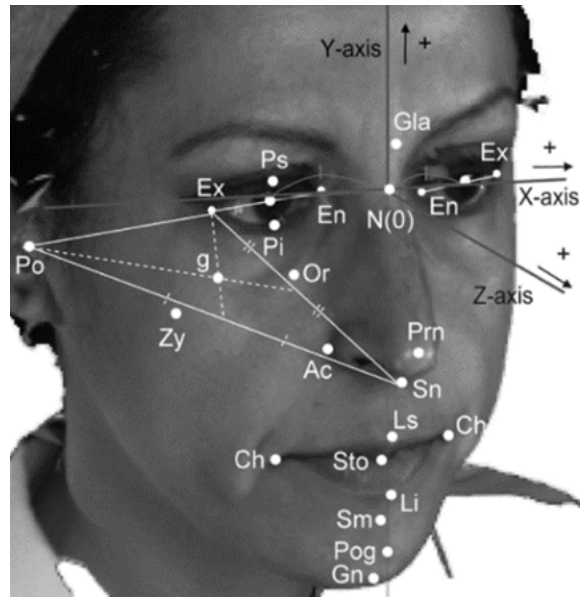


図 7 座標系

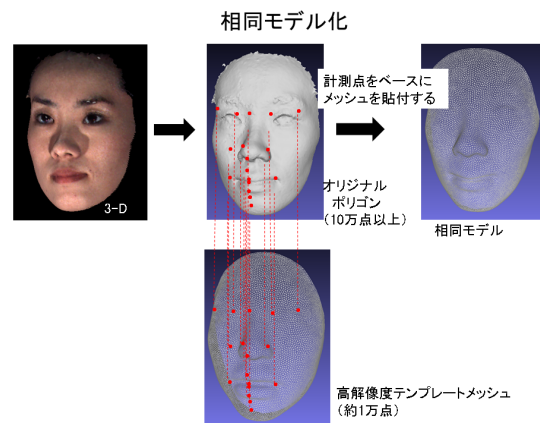


図 8 相同モデル化

を評価した。

4.2.3 結果

術前後の軟組織変化を図 12 に示す。口唇部は術後に有意に後退し、鼻・おとがい・頬部は有意に前突していることが示された。セファロ画像より、頭蓋底前後径・顔面高の有意の増加と、下顎実効長の増加に伴う ANB 角の有意な減少、U1 と L1 の有意の舌側傾斜移動を認めた (図 13, P=0.05)。抜歯後の三次元顔面形態を予測する AI システムが開発された。それ

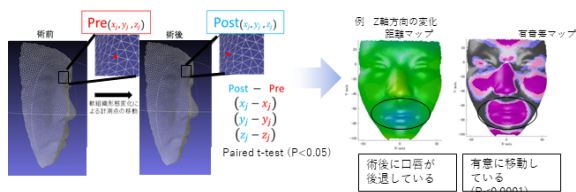


図9 術前から術後にかけての移動量の有意の差の検定 (paired t-test)

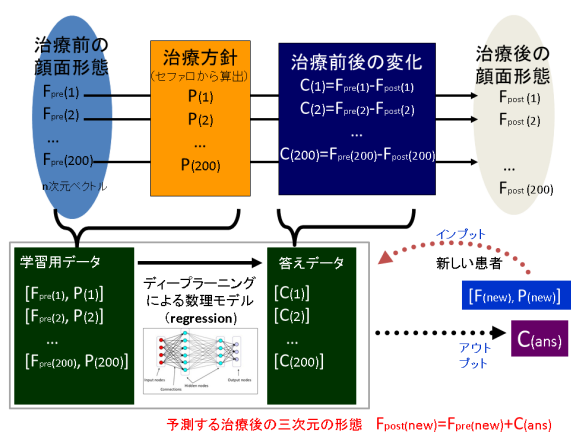


図10 数理モデル

それぞれの症例における誤差の平均 (AveEachPt) が 1mm 以下の症例を成功と定義した場合に、全体の成功率は 98 %であった。平均誤差は 0.69mm であった。最大誤差を示す部位は下唇であった (図 14, 図 15)。予測精度は臨床応用可能な範囲であると考えられた。

5 今年度の進捗状況と今後の展望

5.0.1 臨床応用

臨床応用を目的として、三次元顔予測 AI とセファロ自動認識 AI を組み込んだ GUI アプリケーションを作成した。(図 16) 今後、実際の臨床に用いることが可能かどうかについて検討を行う。

6 研究業績一覧 (発表予定も含む)

受賞

- 谷川 千尋. IADR Innovation Award for excellence in orthodontics research. Development of artificial intelligence systems to predict facial morphology after orthodontic treatment, 2019 年 6 月.
- 谷川 千尋. 日本口蓋裂学会 優秀ポスター賞, 片側性唇顎口蓋裂患者における長期予後因子の検討, 2019 年 5 月.
- 谷川 千尋. 日本矯正歯科学会優秀賞, 矯正歯科治療後の三次元顔形態を予測する人工知能システムの開発, 2018 年 11 月.
- 松川誠, 谷川 千尋, 大槻 浩一, 西尾 崇弘, 中川 記世子, 青海 哲也, 磯村 恵美子, 田中 晋, 山城 隆, 古郷 幹彦. 日本口蓋裂学会 ポスター賞, 片側性唇顎口蓋裂児に対する PNAM 治療における顔面および歯槽形態の 3 次元的变化, 2018 年 6 月.

学術論文 (査読あり)

- Tanikawa C, Takata S, Takano R, Yamanami H, Edlira Z, Takada K. Functional decline in facial expression generation in older women: A cross-sectional study using three-dimensional morphometry, PloS one, 14(7), e0219451, 2019.
- Tanikawa C, Akcam MO, Takada K. Quantifying faces three-dimensionally in orthodontic practice, European Association for Cranio-Maxillo-Facial Surgery 47(6) 867 - 875 6 2019 .
- Tanikawa C, Lee D, Oonishi R, Aikawa T, Kogo M, Yamashiro T. The elimination of dental crowding and develop-

	顔面表面の座標番号				平均
患者番号	d(1,1)	d(1,2)	... d(1,j)	... d(1,6017)	AveEachPc(i=1)
	d(2,1)		d(2,j)	d(2,6017)	AveEachPc(i=2)
	⋮		⋮	⋮	⋮
	d(i,1)	d(i,2)	... d(i,j)	... d(i,6017)	AveEachPc(i)
	⋮		⋮	...	⋮
	d(55,1)	d(55,2)	... d(55,j)	... d(55,6017)	AveEachPc(i=6017)
平均	AveEachPt(j=1)	AveEachPt(j=2)	... AveEachPt(j)	... AveEachPt(j=55)	TotalAve
	StdEachPt(i=1...55,j=1)	StdEachPt(j=2)	... StdEachPt(j)	... StdEachPt(j=55)	

図 11 誤差 d の平均の方法 (AveEachPt, AveEachPc, TotalAve の計算方法)d(I,j) は i 番目の患者の j 番目の顔の誤差を表す。

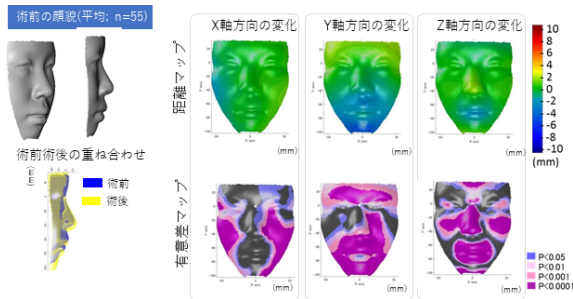


図 12 全症例平均の術前術後軟組織変化 (n=55)

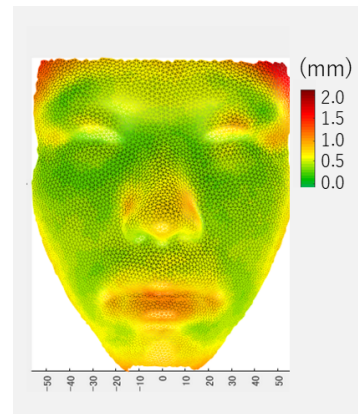


図 14 誤差 (予測された顔面表面と実際の治療後の顔面表面の絶対距離)

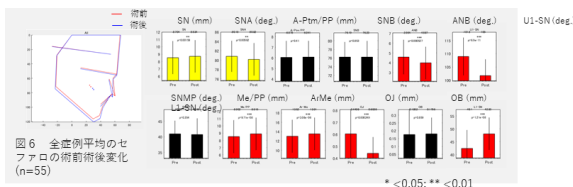


図 13 全症例平均のセファロの術前術後変化 (n=55)

Kamioka H, Yamashiro T. A Novel Method to Detect 3D Mandibular Changes Related to Soft-Diet Feeding. *Frontiers in physiology*, 8 567 8 2017.

学術論文 (査読なし)

- [Kajiwara T](#), [Tanikawa C](#), [Shimizu Y](#), [Chu C](#), [Yamashiro T](#), [Nagahara H](#). Using Natural Language Processing to Develop an Automated Orthodontic Diagnostic System. arXiv:1905.13601, 2019.
- [Lee C](#), [Tanikawa C](#), [Lim JY](#), [Yamashiro T](#). Deep Learning based Cephalometric Landmark Identification using Landmark-
- [Tanikawa C](#), [Takada K](#). Test-retest reliability of smile tasks using three-dimensional facial topography, *The Angle orthodontist* 88(3) 319 - 328 5 2018.
- [Kono K](#), [Tanikawa C](#), [Yanagita T](#),

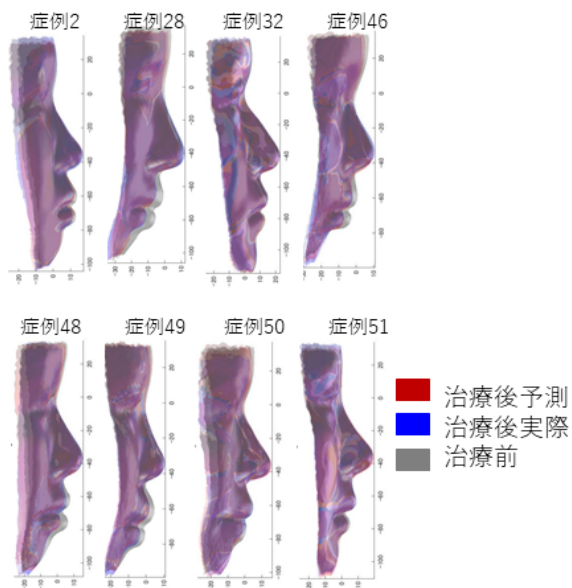
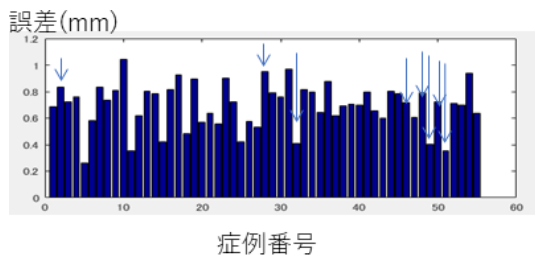


図 15 各症例の誤差 (矢印に示した症例を例示した)

dependent Multi-scale Patches. <http://arxiv.org/abs/arXiv:1906.02961>, 2019.

国際会議プロシーディングス (査読あり)

- Tanikawa C, Shiraishi Y, Kato T, Yamashiro T. Three-dimensional Airway Morphology in Class II Patients, IADR, 2020.
- Wu TH, Tanikawa C, Shintaku Y, Yamashiro T, Ko CC. Morphometric Measurements and Shape Analysis of Unilateral Palatal Cleft, IADR, 2020.
- Tanikawa C, Nakamura M, Nagata N, Trotman CA, Yamashiro T.

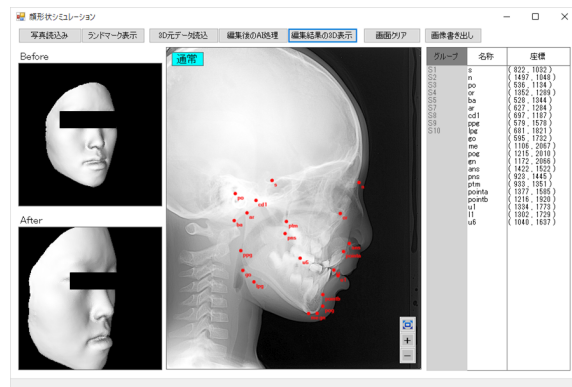


図 16 臨床応用に用いるシステム画面

Three-Dimensional Markerless Time-Sequential Smile Analysis, IADR, 2020.

- Yoshikawa H, Tanikawa C, Lim JY, Inubushi T, Tsukiboshi Y, Yamashiro T. Landmark-based analysis of 3D CBCT in Class II Patients, IADR, 2020. Three-Dimensional Markerless Time-Sequential Smile Analysis, IADR, 2020.
- Tsukiboshi Y, Tanikawa C, Yoshikawa H, Yamashiro T. Surface-based Analysis of the Mandibular Shape in Class II Patients, IADR, 2020.

国内学会 (査読あり)

- 月星 陽介, 谷川 千尋, 山城 隆. 三次元顎顔面硬組織形態の客観的評価手法の確立と信頼性の検討, 日本矯正歯科学会大会プログラム・抄録集 77回 262 - 262 10 2018.
- 清水 優仁, 谷川 千尋, 村田 征矢, リー・チョンホ, 山城 隆. 矯正歯科治療における顔面画像所見記述文生成を行う Artificial intelligence(AI) の開発, 日本矯正歯科学会大会プログラム・抄録集 77回 262 - 262 10 2018.

- Tanikawa C, Akcam MO, Takada K. Quantifying faces three-dimensionally in orthodontic practice: two cases of Class III and jaw deviation underwent orthognathic surgeries, 2018 AAO Annual Session, Walter E. Washington Convention Center, Washington, DC, May 3-8, 2018.
- 新宅 優子, 谷川 千尋, 相川 友直, 山城 隆, 古郷 幹彦. 上下顎移動術を行った顎変形症患者における三次元顔面形態変化のパターン化, 日本顎変形症学会雑誌 28(2) 190 - 190 5 2018.
- 松川誠, 谷川 千尋, 大槻 浩一, 西尾 崇弘, 中川 記世子, 青海 哲也, 磯村 恵美子, 田中 晋, 山城 隆, 古郷 幹彦. 片側性唇顎口蓋裂児に対する PNAM 治療における顔面および歯槽形態の 3 次元的变化, 日本口蓋裂学会雑誌 43(2) 167 - 167 4 27, 2018.

その他（特許，プレス発表，著書等）

- 谷川 千尋, 特願 2019-46443 治療後の表情表出時の顔面形態予測方法
- 谷川 千尋, 特願 2018-181619 セファロ画像における計測点の自動認識方法
- 谷川 千尋, 高田 健治. WO2017-069231 人体における治療後の形態予測方法及びシステム
- 谷川 千尋, 高田 健治. 特開 2016-085490 顔形態の評価システム及び評価方法