

# 立体内視鏡を用いた鼻咽腔運動様相の定量解析法の開発

中野 明日香

山口大学大学院医学系研究科

情報解析医学系専攻 歯科口腔外科学分野

平成 27年 12月

研究 (1) の内容は下記の学術雑誌に掲載中である。

Quantitative analysis of velopharyngeal movement using a stereoendoscope: accuracy and reliability of range images

Asuka Nakano, Katsuaki Mishima, Ruriko Shiraishi, Yoshiya Ueyama

Computer Aided Surgery

研究 (2) の内容は下記の学術雑誌に投稿中である。

Quantitative analysis of velopharyngeal movement by applying principal component analysis for range images produced by a three-dimensional endoscope

Asuka Nakano, Katsuaki Mishima, Mami Shiraishi, Hirotsugu Umeda, Yoshiya Ueyama

Journal of Laryngology & Otology

## 目 次

1. 要旨	4
2. 緒言	6
3. 3.1.研究 (1)	10
3.2.研究 (2)	21
4. 考察	29
5. 結論	32
6. 謝辞	33
7. 参考文献	34

## 1. 要旨

口蓋裂患者が正常な言語機能を獲得するためには手術による軟口蓋の筋肉再建後、リハビリテーションにより正常な鼻咽腔閉鎖機能を獲得することが必要であるため、鼻咽腔閉鎖機能を正確に判断することが言語治療において極めて重要となる。一般にこの鼻咽腔閉鎖機能を評価するために内視鏡の検査が行われているが、定性的な観察にとどまり、三次元的、定量的に鼻咽腔運動様相を詳細に分析する方法がないのが現状である。

そこで、近年立体視を目的に開発された立体内視鏡を用いて、鼻咽腔運動様相の定量計測法の開発に取り組んだ。先端に CCD を 2 個配することにより視差を有する立体内視鏡に、新規に開発したパターン照射光学系ユニットを併用して鼻咽腔計測システムとして開発した。照射されたパターンを利用して、左右画像の対応付けを行い、Birchfield らの方法を用いることで、鼻咽腔の距離画像、すなわち 4 次元情報を有する鼻咽腔の距離画像を作成することに成功した。

本研究では、まず、作成した距離画像の精度を明らかにする目的に、2 点間の距離計測精度、対象と内視鏡先端間の至適計測距離、

撮影の安定性の評価、時間軸に沿った精度について検討した。その結果、専用の固定装置を用いて内視鏡先端を対象から 6.0cm 以下になるように設置した場合、ブレの少ない高精度の 4 次元情報を有する距離画像が作成されることがわかった。

次に、健常男性 10 名、女性 10 名を対象に得られた鼻咽腔距離画像データを元に/a/発音時の軟口蓋の動きを解析した。軟口蓋の距離画像上で仮想グリッドを決定し、そのグリッド交点の三次元座標値に対し、主成分分析を応用することで発音時の鼻咽腔運動様相を定量解析する方法を考案した。その結果、第 1 主成分は軟口蓋の後上方への運動、第 2 主成分は軟口蓋の上方への運動の特徴を示していた。さらに、第 1 主成分、第 2 主成分を用いて判別分析を行った結果、54.6%の正答率を持って男女が区別され、換言すると性差がないことが示唆された。また、グリッド交点の重心の最大移動量は、男性で 4.74mm、女性で 4.66mm であり、性差はなかった。立体内視鏡より得られた距離画像に主成分分析を応用することにより、鼻咽腔運動様相の特徴を的確にとらえることが可能な定量解析方法の一つであると考えられた。

## 2. 緒言

口蓋裂患者が正常な言語機能を獲得するためには手術による軟口蓋の筋肉再建後、リハビリテーションにより正常な鼻咽腔閉鎖機能を獲得することが必要である。さらに、その鼻咽腔閉鎖機能の獲得の有無が、その後の言語治療の大きな分岐となるため、鼻咽腔閉鎖機能を正確に判断することが言語治療を効果的に遂行するためには必須である<sup>1-4)</sup>。鼻咽腔閉鎖機能の評価には、これまで鼻咽腔内視鏡検査、ナゾメーター検査、構音時頭部 X 線規格撮影、鼻咽腔 X 線造影検査、聴覚的判定などの方法が広く用いられてきた<sup>5)</sup>。このなかでナゾメーター検査は定量的な検査方法ではあるが、鼻咽腔の動きを直接評価するものではなく、また、これ以外の検査は定性的な評価にすぎない。すなわち、鼻咽腔運動様相を定量的に分析する方法がないために、いまだその詳細は明らかとされず、非常に遅れている分野である。近年 CT、MRI などを用いた評価方法も報告されているが、口腔内の補綴物や発音補正装置などによる金属のアーチファクトが計測の妨げになることや、被曝や簡便性に欠けるなどの問題点があった<sup>6)、7)</sup>。従って、鼻咽腔運動様相を定量的かつ三次元的に計測できるシステムの開発は口蓋裂患者の言語診断や、言語治

療の効果判定に有用であると考えられる。

そこで、鼻咽腔運動を三次元的、定量的に計測可能な技術の実現を目指し、立体内視鏡を用いた鼻咽腔運動の計測法の開発に取り組んだ<sup>8)</sup>。内視鏡は先端径 5.4mm、先端に 1/10 インチのマイクロ CCD が 2 個並置された硬性鏡で、この先端部に連結する形でパターン照射光学系ユニットを新規に開発した (図 1、2)。内視鏡から得られる視差を有する左右 CCD からの画像は正確に同期され、ワークステーションに 30 フレーム/秒のサンプリングレートにて 640×480 ピクセルの解像度でキャプチャーされる。内視鏡画像の特性である画像の歪みや中心のズレは Tsai アルゴリズム<sup>9)</sup> を用いて補正した。照射されたパターンを利用して左右画像間の対応付けを行い、Birchfield のアルゴリズム<sup>10)</sup> を応用することにより距離画像の作成に成功した (図 3)。

本研究では、内視鏡計測技術の実用化に向けて、内視鏡から作成される距離画像の精度と信頼性を検証したうえで、被験者を用いて、新たに考案した鼻咽腔の定量解析法を適応し、その有用性を検討した。なお、以下の研究は山口大学倫理委員会の承認のもと実施された (H24-58)。

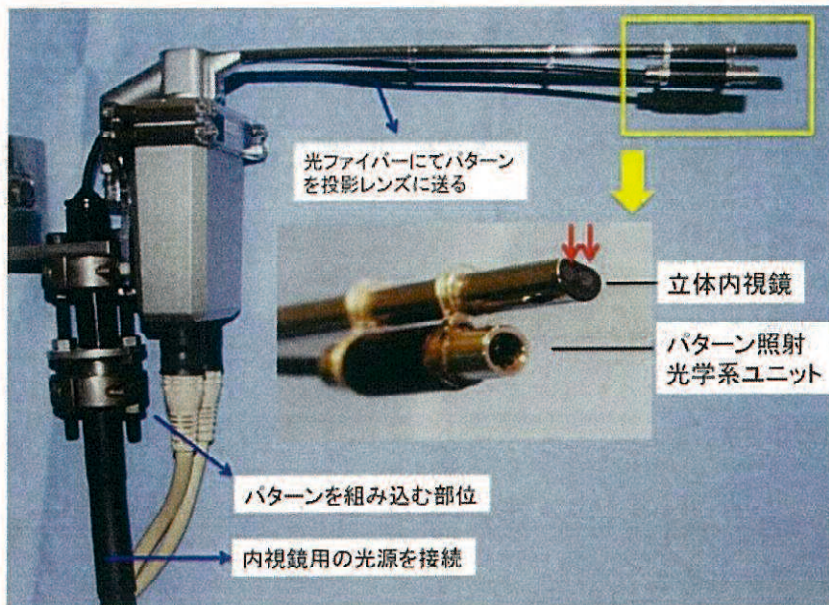


図1 内視鏡鼻咽腔計測システム

内視鏡先端部は直径 5.4mm、1/10 インチのマイクロ CCD を 2 個配している（図中の赤い矢印で示す。）新規に開発したパターン照射用の光学系を内視鏡先端部に連結して、内視鏡鼻咽腔計測システムとして開発した。

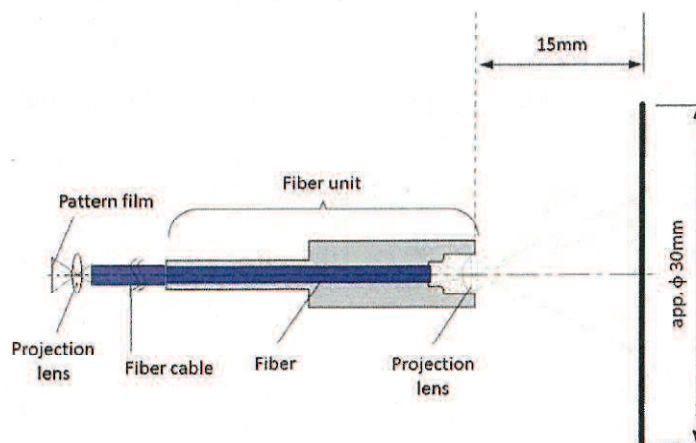


図2 パターン照射光学系ユニット

有効径  $\phi 2.0\text{mm}$ 、焦点距離  $8.1\text{mm}$  の投影レンズを先端に配置し、内視鏡用の光源に接続した。パターンは光源に近い部分に組み込み、一旦パターンを結像させた後に光ファイバーによって先端に送られる。

(Mishima K, Nakano A, Shiraishi R, Ueyama Y: Range image of the velopharynx produced using a 3D endoscope with pattern projection. Laryngoscope 123:122-126, 2013より引用)



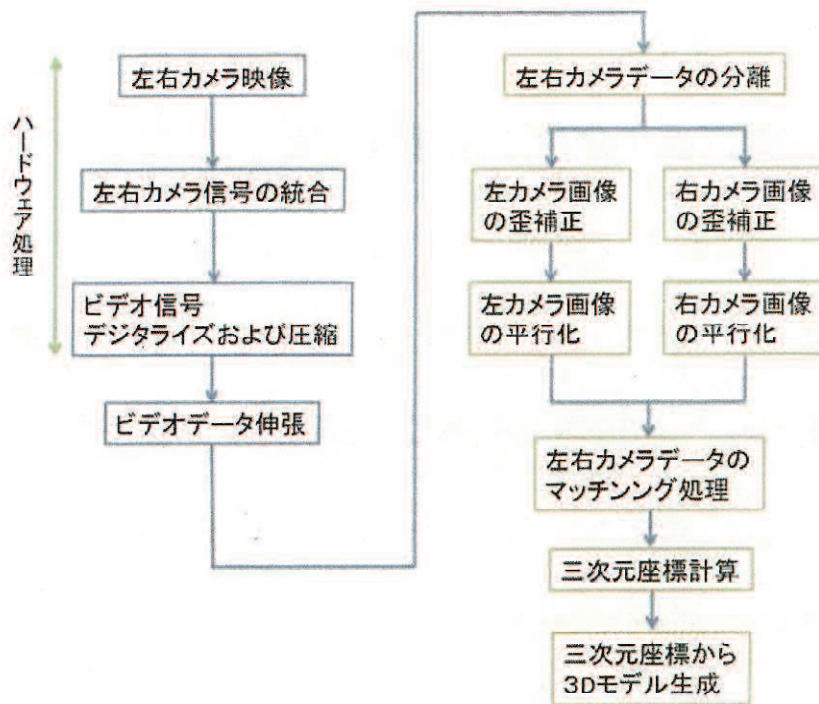


図3 画像処理の流れ

ワークステーションにキャプチャーされた画像は、まず左右の画像に分離された後、インターレース補間、歪み補正、中心補正、レクティファイ処理等を行った上で左右画像間の対応付けを行い、視差を算出して距離画像が作成される。

### 3.1.研究 (1)

#### 作成された距離画像の精度と信頼性に関する検討

##### 目的

内視鏡鼻咽腔計測システムから作成される距離画像の精度、対象と内視鏡先端の位置づけ、専用の内視鏡固定装置を用いて計測する場合の対象と内視鏡間の位置変化（ブレ）、時間軸に沿った精度を明らかにする目的で以下の検討を行った。

##### 方法

###### ① 距離計測の精度

気管挿管トレーニング用シュミレータ（以下鼻咽腔模型、日本ライトサービス株式会社、東京）（図 4）を用いて 2 点間の距離計測の精度を検証した。本システムによって作成される連続する 10 フレーム（30 フレーム/1 秒）の距離画像（図 5）を用いて、模型上に 5mm 間隔で印記した垂直方向と水平方向の 2 点間の距離を計測した。統計解析ソフト（IBM SPSS, ver.19）を用い、1 人の検者で 5 回繰り返し測定した検者内信頼性係数 ICC(1,1)および、3 人の検者がそれぞれ 1 回ずつ測定した検者間信頼性係数 ICC(2,1)を求めた。信頼性の判定基準として Landis ら<sup>11)</sup> の判定基準を用いた（表 1）。この判

定基準に従い  $\kappa$  値が 0.81 以上で almost perfect と判定した。

表 1 Landis ら<sup>11)</sup> の判定基準

$\kappa$	判定
0.81-	almost perfect
0.61-0.80	substantial
0.41-0.60	moderate
0.21-0.40	fair
0.0-0.20	slight

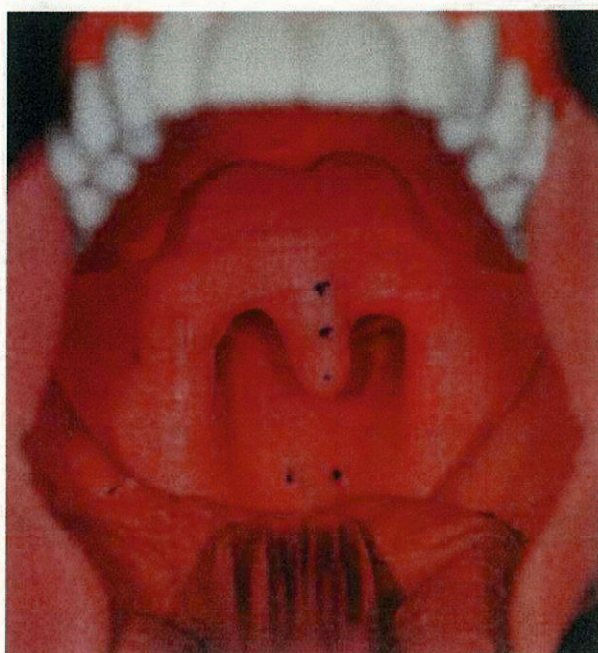


図 4 精度検証に用いた気管挿管トレーニング用シュミレータ

気管挿管トレーニング用シュミレータ上に 5mm 間隔で垂直方向と水平方向の 2 点を印記し、2 点間の距離計測精度を調べた。

(Mishima K, Nakano A, Shiraishi R, Ueyama Y: Range image of the velopharynx produced using a 3D endoscope with pattern projection. Laryngoscope 123:122-126, 2013 より引用)

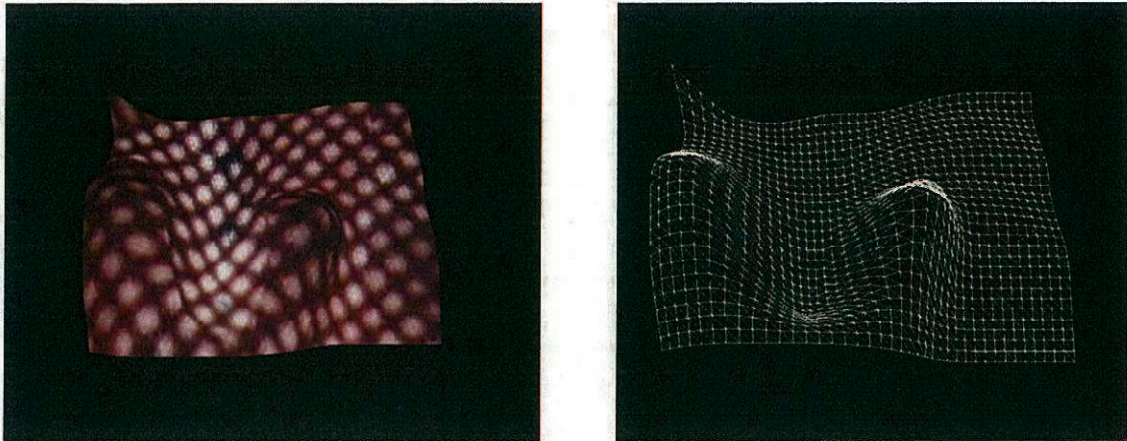


図 5 距離画像

照射されたパターンを利用して左右の画像間の対応付けを行い、Birchfield のアルゴリズムを利用して奥行き情報を求めて距離画像を作成した。左にテクスチャー表示、右にメッシュ表示を示す。

## ② 対象と内視鏡先端の至適計測距離の検討

対象と内視鏡先端の適切な計測距離を明らかにするために、対象と内視鏡先端の間の距離を 2cm から 5mm 間隔で 8cm まで距離を設けて、計測距離の違いによる精度を調べた。対象として方眼紙を撮影し、それから作成した距離画像上の 5mm の計測値を理論値 (5mm) と比較することで計測精度を評価した。対象と内視鏡先端の計測距離の設定には、位置決め精度  $\pm 0.1\text{mm}$  以内の電動アクチュエータ (SUS 株式会社、静岡) (図 6) を用いた。

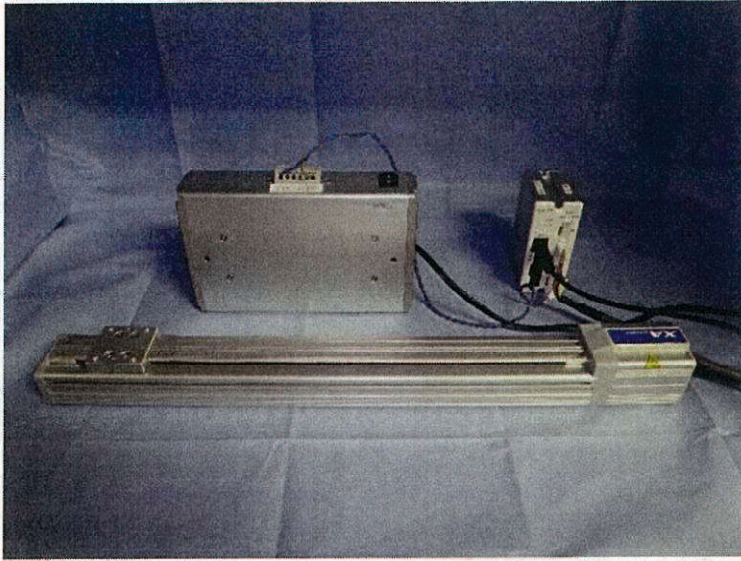


図6 電動アクチュエータ

対象と内視鏡先端の至適計測距離の検討に用いた装置を示す。本装置はリニアモータを用いてテーブルをスライドさせる駆動方式のアクチュエータで、 $\pm 0.1\text{mm}$  以内の高精度での位置決めが可能である。

### ③ 撮影の安定性の評価

計測時に対象と内視鏡間の位置変化（ブレ）が予測されるため、専用の内視鏡固定装置を作製した（図7）。これを用いて計測する際の対象と内視鏡間の位置変化、すなわち安定性を検証した。

健常成人として、男性6名、平均年齢27.8歳（25-31歳）、女性4名、平均年齢27.3歳（24-29歳）を対象とした。いずれも発音障害等なく、顎顔面領域に異常のないものとした。

後頭部を壁に付けた状態で椅子に座った被験者に対し、任意の位

置で固定可能な装置を用いて内視鏡を固定し、口を開けた状態で右側上顎第一大臼歯を撮影した。この固定方法で記録する場合の内視鏡と被写体間のブレを評価するために、得られた距離画像（図8）の近心口蓋側咬頭の座標値を計測し、1秒間、30フレームの座標値の変化を調べた。

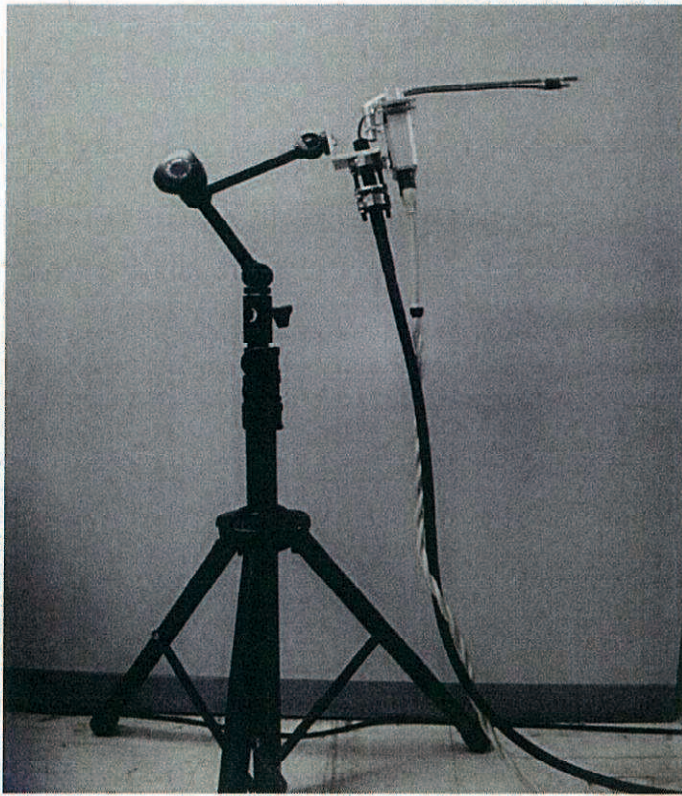


図7 内視鏡固定用装置

スタンドに多関節アームを連結させ、内視鏡を任意の位置で固定可能な装置を作製した。

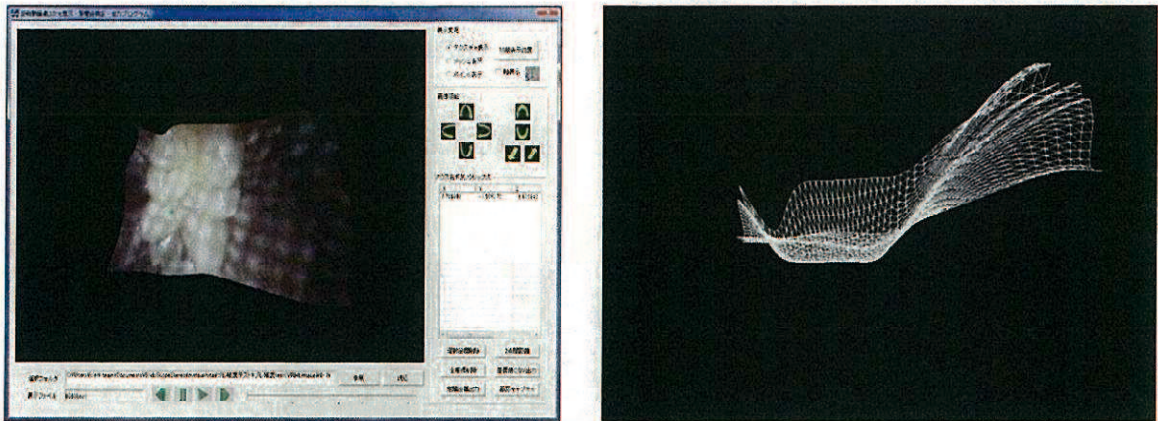


図 8 右側上顎第一大臼歯の距離画像

内視鏡固定用装置を用いて記録したときの内視鏡と被写体間のブレを評価した。右側上顎第一大臼歯を撮影し、得られた距離画像の近心口蓋側咬頭の座標値を計測し、1 秒間、30 フレームの座標値の変化を調べた。右側上顎第一大臼歯の距離画像を示す（左；テクスチャー表示、右：メッシュ表示）。

#### ④時間軸に沿った精度の評価

鼻咽腔の運動様相を定量的に計測するためには 3 次元情報だけではなく時間の要素を加えた 4 次元情報を取り扱う必要がある。そのため、3 次元的な計測精度に加え、時間軸に沿った精度を検証した。

スライドテーブルに待針を固定し、その先端を水平方向、垂直方向から撮影して距離画像を作成した。1 フレーム(1/30sec)あたりの移動量を計測し、撮影時のフレームレートから算出される 1 フレームあたりの移動量（理論値）と比較することで時間軸に沿った精度を評価した（図 9）。一般に健常者の軟口蓋の挙上運動速度が 20-70mm/sec であり<sup>12,13)</sup>、また計算の利便上、電動アクチュエータ

のスライドテーブル部分が 30mm/sec, 60mm/sec, 90mm/sec (理論値はそれぞれ 1mm, 2mm, 3mm) で移動するように設定し

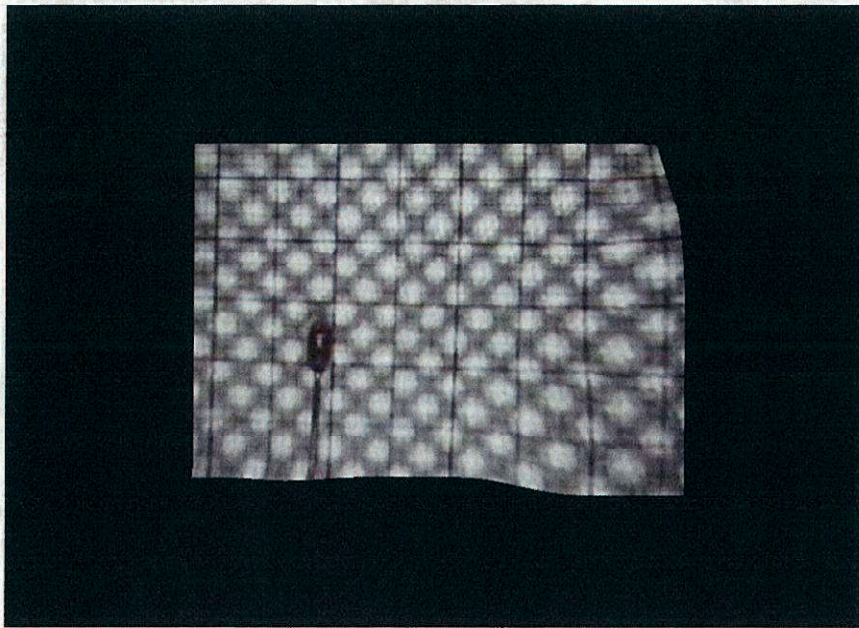


図 9 時間軸精度評価

電動アクチュエータのスライドテーブル部分に待針を固定し、30mm/sec, 60mm/sec, 90mm/sec で移動させた一連の運動を撮影し距離画像を作成した。1フレーム(1/30sec)あたりの待針先端部の移動量を計測し、撮影時のフレームレートから算出される1フレームあたりの移動量(理論値)と比較することで時間軸に沿った精度を評価した。



## 結果

### ① 距離計測の精度

連続する10フレームの2点間距離計測における標準誤差は水平方向で0.02mm、垂直方向で0.01mmであった(表2)。1人の検者で5回繰り返し測定した検者内信頼係数 ICC(1,1)は0.83、3人の検者がそれぞれ1回ずつ測定した検者間信頼係数 ICC(2,1)は0.94であった(表3)。

表2 2点間の計測距離と標準誤差 (mm) 理論値 5.0mm

	最小値	最大値	標準誤差
水平的距離	4.90	5.12	0.02
垂直的距離	4.95	5.06	0.01

表3 検者内信頼係数 ICC(1,1)と検者間信頼係数 ICC(2,1)

	級内相関係数
ICC (1,1)	0.83
ICC (2,1)	0.94

## ② 対象と内視鏡先端の至適計測距離

対象と内視鏡先端の距離は 6cm 以上離れると、計測誤差が大きくなることがわかった (図 10)。

実測値 (mm)

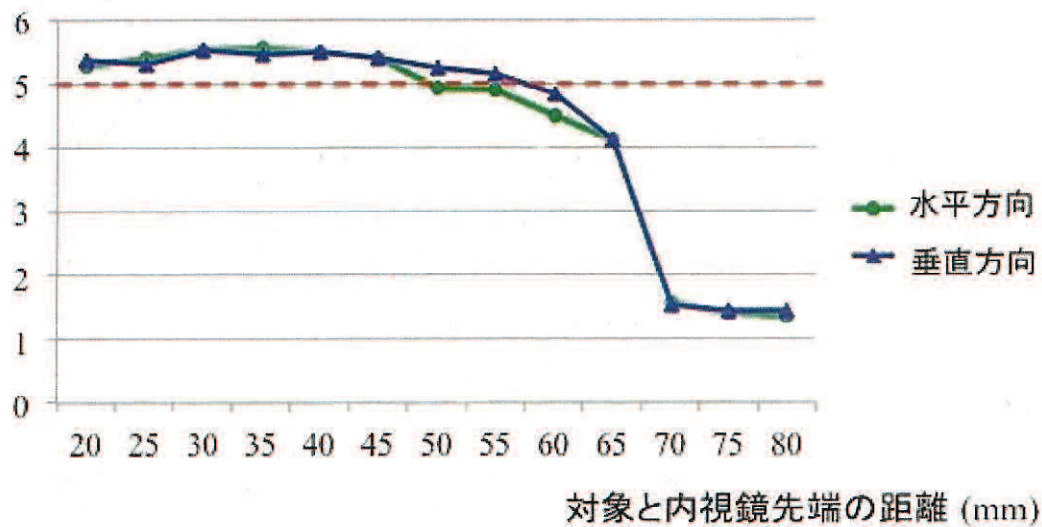


図 10 至適計測距離

X 軸に対象と内視鏡先端との距離、Y 軸に実測値、対象として計測した方眼紙上の 5mm (理論値) を赤の破線で示す。対象と内視鏡先端との距離は 6cm 以上離れると計測誤差が大きくなる。

### ③ 撮影の安定性の評価

連続する 30 フレームにおける、右側上顎第一大臼歯近心口蓋側咬頭の座標値の標準誤差は 0.1mm 以内 (0.01-0.08) であった (表 4)。

表 4 連続する 30 フレームにおける右側上顎第一大臼歯近心口蓋側咬頭の座標値の標準誤差

被験者番号	X 座標値 (mm)	Y 座標値 (mm)	Z 座標値 (mm)
1	0.01	0.02	0.05
2	0.01	0.01	0.03
3	0.02	0.01	0.05
4	0.03	0.03	0.05
5	0.05	0.01	0.08
6	0.01	0.02	0.08
7	0.04	0.01	0.05
8	0.01	0.01	0.03
9	0.03	0.02	0.06
10	0.01	0.01	0.03

### ④ 時間軸に沿った精度の評価

1 フレームあたりの移動量は理論値と比較し、誤差は水平方向で平均 9.16%、垂直方向で平均 9.27%であった (表 5)。

表 5 時間軸に沿った精度 ( )理論値

	30 mm/s (mm)	60 mm/s (mm)	90 mm/s (mm)	平均 (%)
水平方向	1.19 (1.00)	2.07 (2.00)	3.02 (3.00)	9.16
垂直方向	1.06 (1.00)	2.12 (2.00)	3.10 (3.00)	9.27

## 小括 (1)

本システムから作成される距離画像の精度と信頼性について検証し、以下の結果を得た。

内視鏡鼻咽腔計測システムを専用の固定装置にて対象から 6cm 以内の距離で計測した場合、得られた距離画像は高い精度と信頼性を有することがわかった。

## 3.2.研究 (2)

### 距離画像に主成分分析を応用した鼻咽腔運動の定量解析法

#### 目的

鼻咽腔運動の定量解析を目的に本研究を行った。軟口蓋は再現性のある明確な解剖学的なランドマークに乏しいため、特定の点を設定して、その座標値を評価することは困難である。そこで、距離画像上に設定した仮想グリッドの交点の座標値に対し主成分分析を応用することにより鼻咽腔運動の定量解析法を開発した。以下にその手法について説明する。

#### 方法

##### ① 距離画像作成および鼻咽腔運動解析

健常成人として、男性 10 名、平均年齢 27.8 歳 (25-38 歳)、女性 10 名、平均年齢 27.3 歳 (25-40 歳) を対象とした。いずれも発音障害等なく、顎顔面領域に異常のないものとした。後頭部を壁に付けた状態で椅子に座った被験者に対し、任意の位置で固定可能な装置を用いて内視鏡を固定し、口を開けた状態で/a/発音時の軟口蓋の動きを口腔側から撮影し距離画像を作成した。

## ② 主成分分析

作成した距離画像上に中心射影法による  $5 \times 5$  の仮想グリッド<sup>14)</sup>を設定し(図 11)、/a/発音時の連続する 36 個の交点の三次元座標値に対し主成分分析を行った。第 1 主成分から第 12 主成分を求め、算出された結果を Body Shape Browser (株式会社エルゴビジョン、大阪)を用い可視化した。また、X 軸に第 1 主成分値、Y 軸に第 2 主成分値を二次元座標上にプロットし、2 群の点の分布に男女差があるかどうか判別分析を行った。さらに、36 個の交点の三次元座標値から重心の移動量を求め、Mann-Whitney の U 検定を用いて性差の有無を検討した。統計解析には統計解析ソフト(IBM SPSS, ver.19)を用いた。

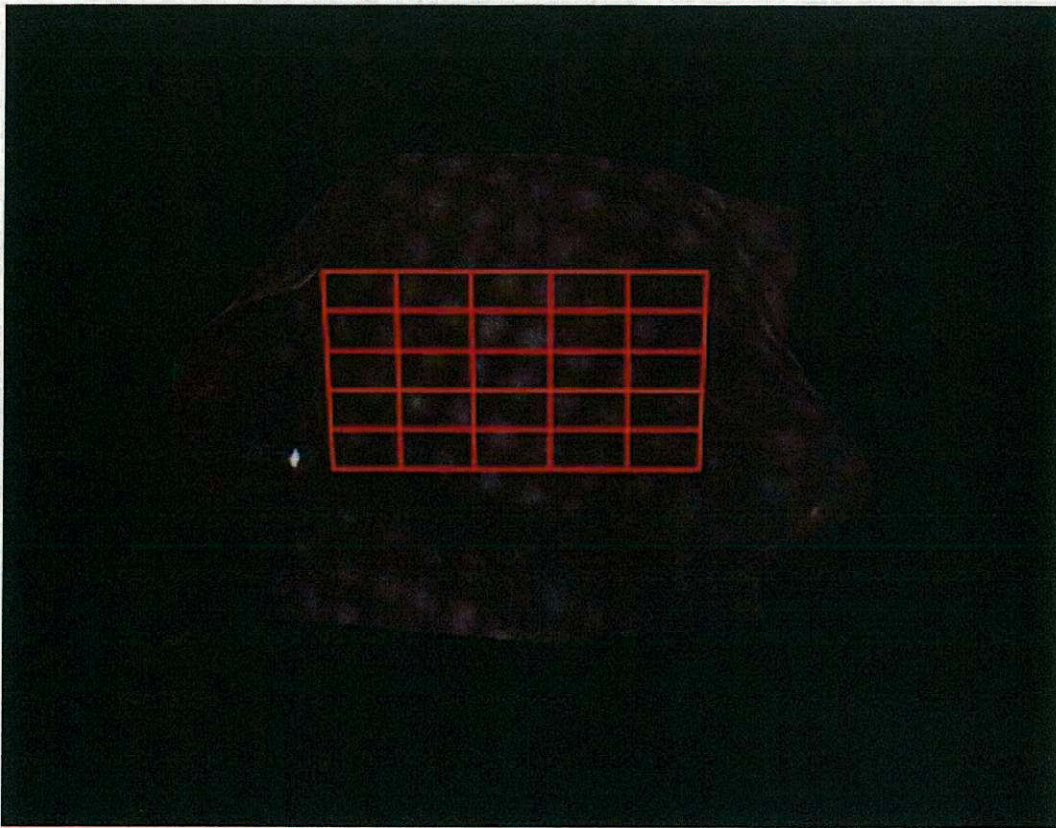


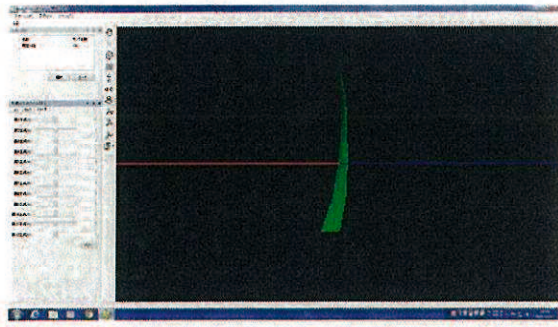
図 11 軟口蓋に設定した仮想グリッド

軟口蓋を撮影し、作成した距離画像上に中心射影法による 5×5 の仮想グリッドを設定した。安静時から/a/発音時の連続するフレームごとの 36 個の交点の三次元座標値を算出した。

## 結果

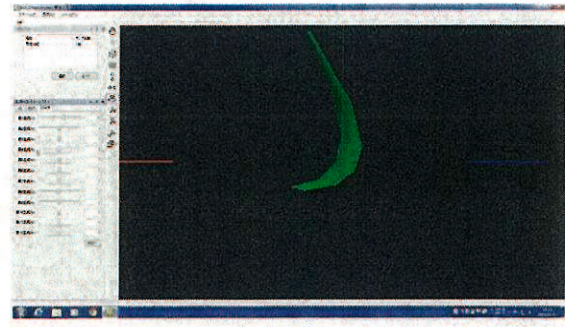
Body Shape Browserにて主成分分析の結果を可視化した結果、第1主成分値の変動に伴い、軟口蓋の後上方への移動が認められ、第2主成分値の変動に伴い軟口蓋の上方への移動が認められた(図12-1,2)。また、第1主成分、第2主成分を用いて判別分析を行った結果、54.6%の正答率で判別されることにより、性差はないと考えられた(図13)。また、重心の最大移動量は、男性で4.74mm、女性で4.66mmであり、男女間に有意差は認められなかった( $p=0.81$ )。





第 1 主成分 (男性)

-5  $\sigma$

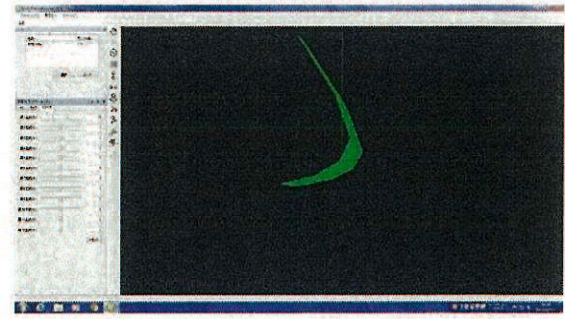


+13  $\sigma$



第 1 主成分 (女性)

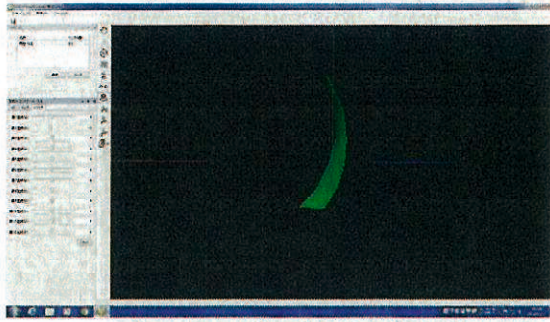
-3  $\sigma$



+15  $\sigma$

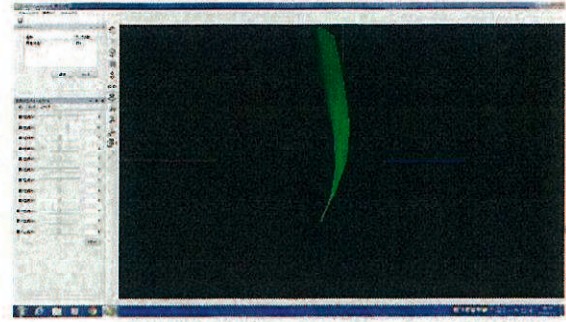
図 12-1 第 1 主成分値に対する軟口蓋の形態

第 1 主成分値に対する軟口蓋の形態を示す。男性女性ともに、軟口蓋の後上方への移動が認められる。

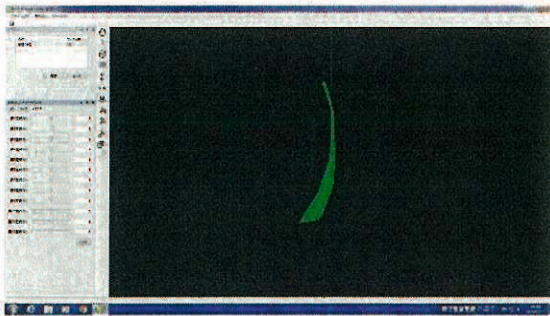


第 2 主成分 (男性)

-5 $\sigma$



+20 $\sigma$



第 2 主成分 (女性)

+5 $\sigma$



-20 $\sigma$

図 12-2 第 2 主成分値に対する軟口蓋の形態

第 2 主成分値に対する軟口蓋の形態を示す。男性女性ともに上方への移動が認められる。

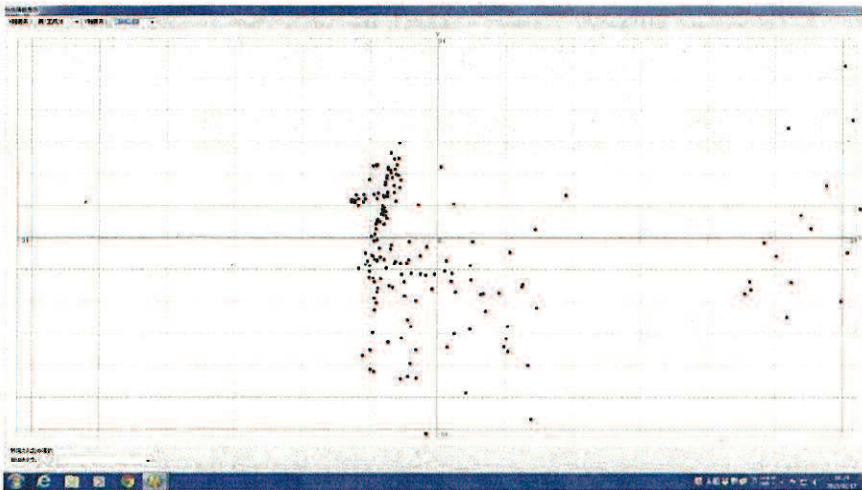
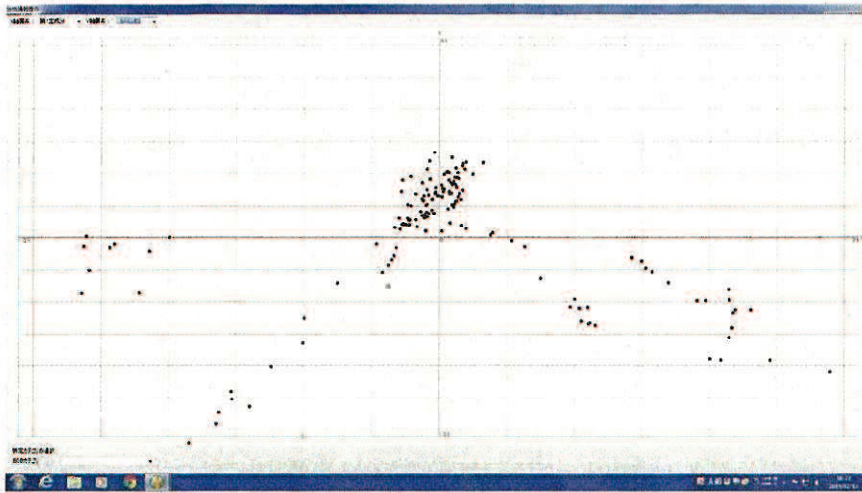


図 13 主成分値の分布 (X 軸 : 第 1 主成分、Y 軸 : 第 2 主成分)

(上 : 男性、下 : 女性)

X 軸に第 1 主成分値、Y 軸に第 2 主成分値をとり、主成分値の分布を示す。男女間に分布の明らかな偏りはみられない。

## 小括 (2)

/a/発音時の鼻咽腔距離画像に対して主成分分析および判別分析を適用し、鼻咽腔運動様相の定量解析および男女間の差を検討し、以下の結果を得た。

- (1) 第 1 主成分値の変動に伴い、軟口蓋の後上方への移動が認められ、第 2 主成分値の変動に伴い軟口蓋の上方への移動が認められ、/a/発音時の軟口蓋の運動成分のうち、後上方への運動成分が最も大きな特徴であり、次いで、上方への運動成分が大きな特徴であることが分かった。
- (2) 判別分析の結果、正答率は 54.6%であり、男女を区別することはできず、すなわち性差はないと考えられた。
- (3) 重心の最大移動量は、男性で 4.74mm、女性で 4.66mm であり、性差はなかった( $p=0.81$ )。

## 4. 考察

内視鏡を用いて形態計測を試みた研究はこれまでいくつか報告されてきた<sup>12),13)</sup>。しかしながら、これらは対象物、例えば腫瘍の大きさや、臓器との距離を計測できるにすぎず、動きまで計測できるものではなく、実用化に至るものはない。本研究では視差を有する左右の画像を得ることができる立体内視鏡に、新規に開発したパターン照射光学ユニットを組み合わせることにより、鼻咽腔の距離画像を30フレーム/秒の時間解像度にて作成することに成功した。これにより作成される鼻咽腔の4次元情報からは単に対象物の大きさや長さだけでなく、運動、変形などといった様々な情報を把握し、解析することが可能になった。

内視鏡鼻咽腔計測システムの開発においては、鼻咽腔運動の計測の際、対象は至近距離であることと、動きが速く大きいという特徴があり、この特徴を十分にとらえることができる必要性があった。そのため、本システムを、この至近距離の対象に対して十分な結像深度を有するパターン照射システムとして開発し、さらに、健常者で20-70mm/secとされる<sup>14),15)</sup>軟口蓋の挙上運動にも十分対応できるものとした。精度検証を行った結果、内視鏡鼻咽腔計測システム

を専用の固定装置にて対象から 6cm 以内の距離で計測した場合、2 点間の距離計測における標準誤差は水平方向で 0.02mm、垂直方向で 0.01mm であり、時間軸に沿った計測誤差は水平方向で平均 9.16%、垂直方向で平均 9.27%であった。

また、作成した距離画像から鼻咽腔運動の定量解析を行う際、再現性のある明確なランドマークに乏しいという鼻咽腔の特徴に十分対応できる必要があった。本研究では鼻咽腔距離画像上に仮想グリッドを設定することにより、解析の再現性を高めることができ、さらに、このグリッドの交点に対して主成分分析を応用することにより新規の鼻咽腔運動の定量解析方法を考案した。

主成分分析は多くの変数により記述された量的データの変数間の相関を排除し、できるだけ少ない情報の損失で全体を少数の合成変数に縮約して説明できるようにする多変量解析の手法である<sup>16-18)</sup>。本研究の対象である鼻咽腔運動は 3 次元的な形態情報に加え、時間軸を考慮した 4 次元情報であり、主成分分析はこのような膨大な情報からの的確に特徴を抽出することが可能な手法であると考えられた。

現状の内視鏡鼻咽腔計測システムはパターン照射装置を外付けした状態で開発しているため、鼻腔からの計測は困難であり、口腔内

からの計測に制限される。従って、本研究では軟口蓋の運動を口腔側から計測した。しかしながら、鼻咽腔運動様相をより詳細に解析するためには、鼻腔側からの撮影が不可欠であり、そのためには、さらに細い先端形状に改良する必要がある。

本研究において、内視鏡鼻咽腔計測システムから作成した距離画像に対し主成分分析の手法を応用することで、鼻咽腔運動様相の定量化が可能になった。今後、この手法を用い、種々の鼻咽腔運動の特徴を分析することにより、口蓋裂患者の鼻咽腔運動の診断システムの構築や、口蓋裂言語治療時に用いる発音補正装置等の設計支援、さらに、その治療効果の評価に本システムを応用できる可能性が考えられた。

## 5. 結論

内視鏡鼻咽腔計測システムを新規に開発し、専用の固定装置を用いて対象とカメラ間距離を 6cm 以内で計測することにより鼻咽腔運動の高精度の 4 次元情報を有する距離画像を作成することに成功した。

内視鏡鼻咽腔計測システムから得られた鼻咽腔距離画像に対して主成分分析を応用する手法は、鼻咽腔運動様相の特徴を定量的に捉えるのに有用であると考えられた。

/a/発音時の軟口蓋の運動は、後上方への運動成分が最も大きな特徴であり、次に上方への運動成分が大きな特徴であり、また、鼻咽腔運動に性差がないことが明らかとなった。



## 6.謝辞

稿を終えるにあたり、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました 上山吉哉 教授に謝意を表します。また、本研究の課題を与え、研究方法や研究に対する姿勢などを直接指導頂きました 三島 克章 准教授に深謝致します。また、鼻咽腔計測システムの開発および主成分分析研究を行うにあたり終始適切な助言を賜り、また丁寧に指導して下さいました株式会社エルゴビジョン 内田 勇治 殿に謝意を表します。

そして、様々なご助言や励ましのお言葉を頂いた、山口大学大学院上皮情報解析医科学講座 歯科口腔外科学分野の教官各位、研究室の皆様、研究生活を支えて下さったすべての皆様方に心から深く感謝致します。

## 7.参考文献

1. Phua YS, de Chalain T: Incidence of oronasal fistulae and velopharyngeal insufficiency after cleft palate repair: an audit of 211 children born between 1990 and 2004. *Cleft Palate Craniofac J* 45:172-178, 2008
2. Inman DS, Thomas P, Hodgkinson PD, Reid CA: Oro-nasal fistula development and velopharyngeal insufficiency following primary cleft palate surgery--an audit of 148 children born between 1985 and 1997. *Br J Plast Surg* 58:1051-1054, 2005
3. Pannbacker MD, Lass NJ, Hansen GGR, Mussa AM, Robison KL: Survey of speech-language pathologists' training, experience, and opinions on nasopharyngoscopy. *Cleft Palate Craniofac J* 30:40-45,1993
4. Pegoraro-Krook MI, Dutka-Souz JC, Marino VC: Nasoendoscopy of velopharynx before and during diagnostic therapy. *J Appl Oral Sci* 16:181-188, 2008
5. Bettens K, Wuyts FL, Van Lierde KM: Instrumental assessment of velopharyngeal function and resonance: A review. *J Commun Disord* 52:170-183, 2014

6. Kao DS, Soltysik DA, Hyde JS, Gosain AK: Magnetic resonance imaging as an aid in the dynamic assessment of the velopharyngeal mechanism in children. *Plast Reconstr Surg* 122:572-577, 2008
7. Perry JL, Kuehn DP: Magnetic resonance imaging and computer reconstruction of the velopharyngeal mechanism. *J Craniofac Surg* 20:1739-1746, 2009
8. Mishima K, Nakano A, Shiraishi R, Ueyama Y: Range image of the velopharynx produced using a 3D endoscope with pattern projection. *Laryngoscope* 123:122-126, 2013
9. Tsai RY: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation* 3:323-344, 1987
10. Birchfield S, Tomasi C: Depth discontinuities by pixel-to-pixel stereo. *International Journal of Computer Vision* 35:269-293, 1999
11. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 1977;33:159-174.
12. Hyun JJ, Chun HJ, Keum B, Seo YS, Kim YS, Jeon YT, Lee HS, Um

- SH, Kim CD, Lim JW, Woo DG, Kim YJ, Lim MT: Feasibility of obtaining quantitative 3-dimensional information using conventional endoscope: a pilot study. *Clin Endosc.* 45:182-188, 2012
- 13.Li ZQ, Linghu EQ, Hu M, Wang XD, Wang HB, Meng JY, Du H. Endoscopic Measurement of variceal diameter. *World J Gastroenterol.* 21:2140-2146, 2015
- 14.Hoopes JE, Dellon AL, Fabrikant JL, Soliman AH: Cineradiographic assessment of combined island flap pushback and pharyngeal flap in the surgical management of submucous cleft palate. *Br J Plast Surg* 23:39-44, 1970
- 15.Pannbacker MD, Lass NJ, Hansen GGR, Mussa AM, Robison KL: Survey of speech-language pathologists' training, experience, and opinions on nasopharyngoscopy. *Cleft Palate Craniofac J* 30:40-45, 1993
- 16.Jolliffe IT: *Principal component analysis.* New York, Springer, 2002
- 17.Mishima K, Yamada T, Ohura A, Sugahara T: Production of a range image for facial motion analysis: a method for analyzing lip motion. *Comput Med Imaging Graph* 30:53-59, 2006

18.Mishima K, Yamada T, Matsumura T, Moritani N: Analysis of lip motion using principal component analyses. J Craniomaxillofac Surg 39:232-236, 2011

