逆運動解析を利用した 3次元眼鏡フィッティングシミュレーション*

田村 謙明**

北嶋 克寛**

3D Fitting Simulation of Eyeglass Frames Using Inverse Kinematics

Noriaki TAMURA and Katsuhiro KITAJIMA

This paper proposes a novel method on 3D fitting simulation of eyeglass frames to individual faces. First, we formulate the fitting operation of the eyeglass frames to the individual faces at real optical shops. We utilize the analogy of the structure between eyeglass frames and robot arms. Under the analogy, the bending angles on eyeglass frames correspond to the rotating angles on robot arms. Then, we extract the simultaneous structural conditional equations which are derived from the matrix equation on a closed loop along the base to the end-effector through the arms using inverse kinematics. We can obtain the optimum bending angles by solving the equations using the Newton-Raphson method. Finally, we will show some examples applied for several frame types and individuals. As a result, it is confirmed that the proposed method is very effective.

Key words: eyeglass frames, spectacles, individual face model, fitting simulation, try on, GFFD, inverse kinematics

1. はじめに

近年、眼鏡フレームの装着シミュレータは、実店舗の眼鏡店および最近普及してきたインターネット上の仮想店舗において幅広く利用されている。しかし、そのほとんどは、利用者が選んだ眼鏡が自分の顔に似合うかどうかを見て確認するという用途に限定されている。自分に似合うかどうかの視覚の確認だけでなく、眼鏡フレームを自分の顔にフィットさせること（以下、フィッティングと呼ぶ）を目的とする本格的な装着シミュレーションに関する研究は、これまでほとんど行われていない。

装着シミュレータの初期のものとしては、2次元の顔画像に眼鏡フレーム画像を重ね合わせて表示する方法を採るものが多い。このため、研究論文として報告されているものは少なく、口頭発表や特許として報告されているものがほとんどである¹⁾²⁾。このような2次元の方法では、眼鏡が自分に似合うかどうかのおよその確認に利用することはできても、フィッティングを目的とする装着シミュレーションには不適である。

3次元モデルを使用したシミュレータ³⁾⁴⁾も存在するが、フィッティングを目的とする研究はきわめて少なく、論文として発表されているものを見つけることは難しい。たとえば、国内では情報処理学会研究会報告として三浦らの研究⁵⁾があるが、この研究は、個人の顔形状をレンジスキャナ（コニカミノルタ製のVIVID）で計測し3Dモデルを生成した上で、眼鏡フレームモデルをその顔モデル上に自動配置することを目的としており、フィッティングまでは行っていない。海外においてはArthur Niswarらの研究⁶⁾が近い研究として挙げられるが、彼らは顔形状に合わせる処理を眼鏡のサイズの拡大・縮小で行っている。しかし、この方法は後述する実際の眼鏡のフィッティング作業とは大きく異なるため、実の眼鏡の装着作業に反映させることはできず、仮想空間上での試着システムで終わっている。この他に、国内外にいくつかの特許があるが、フィッティングまで

を扱っているものは見当たらない。

現在市販されている多くの眼鏡フレームは、あらかじめ決められたサイズと形で大量生産されており、そのままでは眼鏡装着者の顔にぴったりフィットするとは限らない。そこで眼鏡店では、専属のスタッフがその人の顔に対して、きつくもなく緩くもなく、顔にぴったりフィットするようにあらかじめ定められた方法でフレームの形状を変形させている。図1にその様子を示す。この眼鏡を顔にぴったり合わせるフィッティング作業は眼鏡フレームの形状や材質によって異なり、その技術を習得するまでには多くの時間と労力が費やされている^{10)~12)}。

前述したように、この職人のスキルに依存して行われているフィッティング作業を定式化しフィッティング作業そのものを対象とする研究はこれまで存在しなかった。そこで、本論文では、現場で実際に行われているフィッティング作業を定式化し、標準状態の眼鏡フレームモデルが個人の3次元顔モデルに自動的にフィットするようフレームを変形させることを目的とする眼鏡装着シミュレータの手法を提案する。本研究の特徴は、個人の顔形状と眼鏡フレームを容易に復元できる手法を用いることにより低コストで仮想化が実現すること、およびフィッティング作業の定式化にアセンブリモデルの概念¹³⁾¹⁴⁾を導入しロボット等で用いられる逆運動解析を適用できるようにする点にある。これにより、サイズや形状の異なる個人の顔モデルに対して、眼鏡フレームモデルのフィッティングシミュレーションが容易に行えること、およびシミュレーション結果を実際の眼鏡フレームの調整に利用できることを示す。

Fig.1 Frames' adjustment work

* 原稿受付 平成 25 年 4 月 9 日

** 正 会 員 東京農工大学大学院 (東京都小金井市中町 2-24-16)

2. 3次元個人顔形状モデルの生成

眼鏡装着シミュレータを開発する前提条件として、個人の顔形状の3Dモデルを高精度で生成する必要がある。一般に、顔に限らず複雑な3D形状を復元するには、高価な専用の測定装置（レーザースキャナなど）を必要とする。しかし、眼鏡のような単価の低い製品のために高価な測定装置が必要となれば、コスト的な制約からこのような研究開発の目標を設定すること自体が困難となる。このことも、これまで本格的な眼鏡装着シミュレータの開発が行われてこなかった理由のひとつになっていると思われる。

著者のひとりには、個人の顔モデルを低コストでかつ精度よく生成する方法を過去に開発した¹⁵⁾。それは、デジタルカメラからの顔写真の情報だけを基に、あらかじめ用意した標準顔モデルを、GFFD (Generalized Free-Form Deformation) と呼ぶ空間変形手法を用いて変形することにより、個人の顔形状モデルを取得する方法である。この方法によって生成した顔モデルを本研究で用いるが、眼鏡が耳に掛かる部分と鼻パッドが鼻に接触する部分との間の位置精度が問題になる。一般に顔は左右非対称であるので、眼鏡調製用ゲージ（実用新案登録第3111504号）を用いて左右別々に実際の個人顔の中心から耳までの水平方向の距離を測定した結果と顔モデルとの比較実験を行ったところ、その誤差の平均は0.4mmであった。眼鏡フレームの寸法許容差に関する規格¹⁸⁾によると、眼鏡のレンズ枠幅（ほぼ眼鏡の両フレーム間の距離の半分に相当）は0.5mmと規定されているので、これはフィッティングシミュレーションを行うために十分な精度である。

なお、各種眼鏡フレームの3Dモデルについては、本研究では市販の3DCADを用いて生成しているが、画像データからGFFDを用いて3Dモデルを復元する研究を別途行っており、これについては別報で報告する予定である。

3. 眼鏡フィッティング作業の定式化

本章では、実際眼鏡店で行われているフィッティング作業を仮想空間上でどのように定式化してシミュレーションを行うかについて述べる。実は、フィッティング作業における眼鏡フレームの変形はロボットアームが対象物を捕らえる動作におけるアームの変形（回転等）と類似する点（アナロジー）がある。そのアナロジーを利用して、眼鏡フレームをロボットアームとして表現することにより、逆運動解析を利用してフィッティング作業を定式化することが可能になる。

3.1 眼鏡フレームとロボットアームとのアナロジー

フィッティング作業は、通常、フレームの耳掛け（Tip：図2参照）が耳にフィットして掛かるようにフレームの形状を曲げることで行われる。この変形は、眼鏡フレームとロボットアームの構造のアナロジーを利用して、ロボットアームが対象物を捕らえる動作に置き換えて考えることができる。構造のアナロジーとは、ブリッジ（Bridge）およびリム（Rim）がロボットの基部に、耳掛け（Tip）がエンド・エフェクタに、フレームを曲げる箇所であるヨロイ（Endpiece）とテンプル（Temple）がロボットアームの各関節に、それぞれ対応することを言う。図3は、眼鏡フレームをロボットアームに見立てて顔に装着させた様子を描いたものである。

このように眼鏡フレームをロボットアームに見立てることにより、基部座標系→各関節座標系→エンド・エフェクタ座標系

→基部座標系に閉ループが成立し、フィッティング作業に必要なフレーム部分の曲げ角度や長さを導出するために、逆運動学解析の手法を用いることが可能になる¹³⁾¹⁴⁾。

3.2 基部の位置と姿勢の固定

逆運動学の式を誘導するために最初に行うことは、基部（ブリッジとリムに対応）の位置と姿勢を顔に対して決めることである。顔モデルを基準にしたワールド座標系を顔モデルの中心に定め（図3）、基部座標系の原点Bを基部の中心に定める。基部座標系の各軸の向きはワールド座標系と同じとする。顔（ワールド座標系）に対する基部の位置と姿勢の決め方は、眼鏡を顔に掛けさせるときの一般的なルール^{10)~12)}を参考にして、以下の手順とする。

- (1) 基部座標系をx軸について反時計まわりに 10° 回転させる（図4）。この 10° という値は、フィッティング作業における平均的な値である¹⁰⁾。
- (2) 基部の原点をワールド座標系のyz平面に乗せる。
- (3) 基部座標系の原点を瞳の中心の下2mmの高さに一致させる（図5）。この高さで眼鏡を装着させると眼鏡を掛けた顔が自然に見える¹²⁾。
- (4) 眼鏡フレームの鼻パッドに相当する基部の部分が鼻に接触するまで、基部を顔の方向に移動させる。

以上の手順により、基部が顔モデルに固定される。鼻の形に個人差があるにもかかわらず、このような画一的な手順で固定できるのは、鼻パッドが球面对偶の構造（図6）をもっており、鼻の傾斜に合わせて鼻パッド面の向きが自由に変化しているからである。なお、鼻パッドを鼻に接触させる方法と接触位置の決定については文献16)において詳しく述べている。

Fig.2 Eyeglass frames and their parts names

Fig.3 Eyeglass frames represented as robot arms

Fig.4 Leaning the frames

Fig.5 Moving the frames in y direction

Fig.6 Nose-pad of eyeglass frames

Fig.7 Local coordinate systems and parameters in an arm model

3.3 エンド・エフェクタ（耳掛け部分）の位置と姿勢の指定

基部が固定されて次に行うことは、エンド・エフェクタの位置と姿勢を指定することである。その前に、ロボット全体がどのようにモデル化されるかについて、詳細を図7に示す。ヨロイに相当する箇所は3自由度の関節をもち、テンプル上にはこの例では3箇所の関節（自由度2）をもつ。一般に、テンプルの関節数は1～3が多い。

エンド・エフェクタはスライダ型となる。その理由は、図8に示すように、耳掛けは、耳の位置に合わせて任意の位置で曲げることができる部品となっているからである。すなわち、耳に掛かる点Rがスライドすることに相当する（図9(a), (b)）。

このようにモデル化すると、このエンド・エフェクタの標的は、耳掛けが乗っかる位置すなわち耳の付け根の最上点である顔モデル上の点Eとなる（図9(c)）。点Eはポリゴンモデル上の頂点上に設定しているため、点Eの位置が実際の顔における耳の付け根の最上点と微妙にずれる可能性もあるが、耳の周辺のポリゴンの大きさは0.5mmより小さいので、そのずれは許容の範囲内である（2章参照）。

逆運動解析に必要なエンド・エフェクタの位置と姿勢のうち、位置はこの点Eの座標で決まり、姿勢は図10に示す角度 θ によって決まる。 θ は、ヨロイ上の曲げ点をHとしたとき、線分HEとHRとのなす角である。なお、 θ の絶対値がある閾値の範囲内にある場合は、その値をそのまま用いるが（図10参照）、閾値を超える場合はその閾値を用いる。なお、閾値は、この値を超えると耳を痛める可能性がある角度であり（図11(a), (b)参照）、耳掛け部分の素材の硬さによって異なる。

このようにして逆運動解析のための条件が整い、アーム部の各関節角が決められることになる。

Fig.8 Moving the bending point from R_1 to R_2

Fig.9 Analogy between a tip and an end-effector and the target point

Fig.10 Angle to give the orientation of the end-effector

Fig.11 How to give the orientation of the end-effector (tip) when the angle θ is over the threshold value

Fig.12 Frames' closed loop and local coordinates

3.4 逆運動解析のための行列方程式

本研究では、逆運動解析を行うために、図12に示すように、基部とエンド・エフェクタの間に各アームを順に経由するパスとエンド・エフェクタと基部との間の仮想的なパスを考えることにより閉ループができることに着目する。すると、隣接する局所座標系間の座標変換行列を乗じていくとそれが一巡して単位行列になる（元に戻る）という構造条件式が得られる¹³⁾¹⁴⁾。この各変換行列の中には、アームの自由度に相当する変数が含まれており、逆運動解析は、この行列方程式と別の条件式を連立させて解くことになる。解を得るためには、変数の数と独立な式の数が必要である。

図7のロボットアームのモデル上に変数を定義し、座標系 m から座標系 n への変換行列を $T_{m \rightarrow n}$ としたとき、次の行列方程式が成り立つ。

$$T_{10 \rightarrow 0} \cdot T_{9 \rightarrow 10}(L_1) \cdot T_{8 \rightarrow 9}(\phi_9) \cdot T_{7 \rightarrow 8}(\phi_8) \cdots T_{3 \rightarrow 4}(\phi_4) \cdot T_{2 \rightarrow 3}(\phi_3) \cdot T_{1 \rightarrow 2}(\phi_2) \cdot T_{0 \rightarrow 1}(\phi_1) = I \quad (1)$$

ここで、 $\phi_i (i=1, 2, \dots, 9)$ は関節の曲げ角度、 L_i はスライダの移動距離であり、これらは未知の変数である。I は単位行列を表す。また、 $T_{10 \rightarrow 0} = T_{0 \rightarrow 10}^{-1}$ であり、 $T_{0 \rightarrow 10}$ はエンド・エフェクタの位置と姿勢を表す変換行列である。これらを具体的に書くと、次式となる。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ B_x - E_x & B_y - E_y & B_z - E_z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_9 & \sin \phi_9 & 0 \\ 0 & -\sin \phi_9 & \cos \phi_9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \cos \phi_8 & 0 & -\sin \phi_8 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi_8 & 0 & \cos \phi_8 & 0 \\ 0 & 0 & L_3 & 1 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \cos \phi_4 & 0 & -\sin \phi_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi_4 & 0 & \cos \phi_4 & 0 \\ 0 & 0 & L_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_3 & \sin \phi_3 & 0 & 0 \\ -\sin \phi_3 & \cos \phi_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_2 & \sin \phi_2 & 0 \\ 0 & -\sin \phi_2 & \cos \phi_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & 0 & -\sin \phi_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \phi_1 & 0 & \cos \phi_1 & 0 \\ d_x & d_y & d_z & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $\phi_i (i=1, 2, \dots, 9)$ および L_i 以外は既知である。

$L_k (k=1, 2, 3)$ は各関節間の距離で、 θ はエンド・エフェクタの姿勢を決める角度であり、3.3節で述べたように、閾値の範囲内にある場合は次式で与えられる。

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{(B_x + d_x - R_x)(B_y + d_y - E_y) + (B_z + d_z - R_z)(B_z + d_z - E_z)}{\sqrt{(B_x + d_x - R_x)^2 + (B_y + d_y - E_y)^2} \sqrt{(B_x + d_x - R_x)^2 + (B_z + d_z - E_z)^2}} \right) \quad (3)$$

ただし、 (B_x, B_y, B_z) , (R_x, R_y, R_z) , (E_x, E_y, E_z) はそれぞれ点 B, R, E の座標であり（図7, 9, 12 参照）、 d_x , d_y および d_z は、それぞれ点 B と点 H の x , y および z 座標の差分である。

なお、これら既知の情報のうち、 E_x, E_y, E_z は個人顔形状モデルから取得する。

この行列方程式は、6つの独立した式（位置、姿勢それぞれ3）に対し未知数の数が10である。したがって、解くためには4つの条件を加える必要がある。これには、テンプル部分を均一に曲げる、という次式のような条件を加える。

$$\phi_4 = \phi_6 = \phi_8, \quad \phi_5 = \phi_7 = \phi_9 \quad (4)$$

これにより、解くことが可能になる。式(2)を展開すると非線形連立方程式になるので、ニュートン・ラフソン法を用いて解くことができる。

4. 実験と考察

本研究で提案する手法の有効性を確認するため、サイズや形状の異なる眼鏡フレームモデルと顔モデルを使用して、次のような実験を行った。

- (1) 幅の異なる眼鏡フレームを用いたフィッティング
- (2) 奥行き（顔の前後幅）が異なる顔モデルを用いたフィッティング
- (3) 耳の高さ位置が異なる顔モデルを用いたフィッティング

(1)の実験では、平均的なサイズの顔モデルに対して、(a)小さいサイズのフレームモデルおよび(b)大きいサイズのフレームモデルを掛けさせる。(2)の実験では、(c)奥行きが短い顔モデルおよび(d)奥行きが長い顔モデルに対して、平均的なサイズのフレ

ームモデルを掛けさせる。(3)の実験では、(e)耳が低い位置にある顔モデルおよび(f)高い位置にある顔モデルに対して、平均的なサイズのフレームモデルを掛けさせる。表1はそれぞれの条件と得られた変数の値である。それらの結果を図13(a)~(f)に示す。

(a)で得られた変数の値について、角度 ϕ_1 がマイナス値に、角度 ϕ_4 がプラス値になっている。これは、ヨロイ部分で外側に曲げられテンプル部分で内側に曲げられていることを表している。(b)では、(a)の場合と角度の符号が逆になり、ヨロイ部分で内側に曲げられテンプル部分で外側に曲げられている。これらのことは実際のフィッティング作業と一致する結果を示している。また、得られた $\phi_1 \sim \phi_9$ と L_t の各数値を用いて表示した結果を見ると、フレームが自然な形状に曲げられていることが確認できる。

(c)で用いた顔モデルは、瞳の中心と点Eとのz方向の距離が70.5mmであり、(d)で用いた顔モデルのそれは89.3mmである。この距離の差18.8mmが実験で得られた距離 L_t の差18.4mmに現れている。また、距離 L_t が短いほど顔に近い位置で曲げられていることが実験結果から確認できる。

次に、3.3節で述べた角度 θ が閾値の範囲内の場合((a)~(d)が該当)では、フレームがテンプル部分では曲げられずにヨロイ部分だけで曲げられるが、(3)の実験において、角度 θ が閾値の範囲外になるような顔モデルに対して実験を行った。(e)で得られた変数の値について、角度 ϕ_2 がマイナス値に、角度 ϕ_5 がプラス値になっている。これはヨロイ部分で下向きに曲げられ、テンプル部分で上向きに曲げ戻されていることを表している。(f)では、角度の符号が逆になり、これはヨロイ部分で上向きに曲げられ、テンプル部分で下向きに曲げ戻されていることを表している。各値が正しく求められているかについては、表示した図から視覚的に確認できる。

以上の実験結果から、様々な眼鏡フレームおよび顔形状モデルについて、正しくシミュレーションできていることが確認できた。最後に、テキスト付きの数人の個人顔モデルに数種類の眼鏡フレームモデルを装着させた結果を図14に示す。また、シミュレーション結果から出力した三面図画像を基にして眼鏡フレームを調整したものと、眼鏡店の専属スタッフが通常行っている方法で調整したものとを比較を図15に示す。なお、この例では両者にあまり差が見られないが、曲げる箇所や位置は専属スタッフの経験によって異なる場合もある。ただし、途中の曲げ方が異なってもフレームの耳掛けの(鼻パッドからの)位置と姿勢は等しくなるので、装着感には影響を与えない。

5. おわりに

本研究では、以下のような特徴をもつ独創的な眼鏡装着シミュレータを開発した。

- (1) 眼鏡を個人の顔に合わせるためのフィッティング作業を、眼鏡フレームの変形とロボットアームが対象物を捕らえる動作におけるアームの変形との間にアナロジーがあることに着目し、定式化した。
- (2) 定式化とは、ロボットアームと目標物(眼鏡フレームと耳に相当)との間に閉ループが存在し、それに沿って変換行列を乗じて行くと単位行列になるという、ロボットの逆運動解析問題に帰着させたことをいう。
- (3) 個人の顔モデルにフィットするように眼鏡フレームの曲げ角度等を求める問題は、上記行列方程式(非線形連立方程式)を数値解法で解く問題に帰着される。
- (4) サイズや形状の異なる眼鏡と顔に対して、上記方程式を解く際に必要となるエンド・エフェクタの位置と姿勢の情報をモデルから自動的に抽出することを実現した。
- (5) (1)~(4)を眼鏡装着シミュレータとして実装し、各種実験を行い、提案手法の有効性を確認した。

なお、本研究と並行して、様々な眼鏡フレームを写真情報からGFFDを用いて低コストで迅速に生成する方法についても研究を行っており、これについては別報で報告する予定である。

参考文献

- 1) Feng Gao et al.: Interactive eyewear selection system, U. S. Patent 6231188, (2001).
- 2) Tsuyoshi Saigo: Eyeglasses try-on simulation system, U. S. Patent 6142628, (2000).
- 3) Yasufumi Fukuma et al.: Eyeglass frame selecting system, U. S. Patent 6634754, (2003).
- 4) 荻原和浩, 大西 啓介: 3方向から見たメガネフィッティングシステム, 情報処理学会第54回(平成9年前期)全国大会 2(1997)439.
- 5) Marc Abitbol et al.: Spectacles fitting system and fitting methods useful therein, U. S. Patent 6692127, (2004).
- 6) Roman Waupotitsch et al.: Interactive try-on platform for eyeglasses, U. S. Patent 7016824, (2006).
- 7) So Woon Kim et al.: System and method for 3-dimension simulation of glasses, U. S. Patent 0162419, (2005).
- 8) 三浦浩, 山戸佐知男, 山根大作: メガネ試着システムの試作, 情報処理学会研究報告グラフィクスとCAD, 98, 16(1998)1.
- 9) Arthur Niswar et al.: Virtual try-on of eyeglasses using 3D model of the head, Proceedings of the 10th International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications in Industry, (2011)435.
- 10) 熊谷壽, 岡本隆博, 花井譲: よくわかる眼鏡講座 改訂版 上巻, 興隆出版社, 1986.
- 11) 辻一央: 科学的な眼鏡調製, 眼鏡光学出版株式会社, 1996.
- 12) 横田進: 横田流フィッティング術 テクニックブック, さいたま眼鏡技術研究所, 2012.
- 13) 北嶋克寛, 前田康行, 吉川弘之: 閉ループをもつ機構の運動解析及び寸法整合に関する統一的手法の研究, 精密機械, 50, 4(1984)710.
- 14) 北嶋克寛: 運動解析用数式自動生成・処理型ロボットシミュレータの開発, 精密工学会誌, 54, 2(1988)317.
- 15) 北嶋克寛, 赤木康宏, 山内玲, 岡澤直輝, 樋口靖和: GFFDに基づく顔形状モデリングに関する研究, 精密工学会誌, 74, 8(2008)883.
- 16) 田村謙明, 北嶋克寛: 個人顔モデルを用いた眼鏡フィッティングに関する研究, 精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, (2009)943.
- 17) JIS B 7280:2006, 眼鏡光学—眼鏡フレーム—用語.
- 18) JIS B 7285:2008, 眼鏡光学—眼鏡フレーム—基本的要求事項及びその試験方法.

Table 1 Conditions of simulation and results of the variables

Fig.13	Frames	Face		Results of the variables at the left side of frame models(ϕ :degree, L :mm)					
	Size	Depth	Ear's height	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4, ϕ_6, ϕ_8	ϕ_5, ϕ_7, ϕ_9	L_t
Case (a)	Small	Standard	Standard	-8.3	-3.4	0.3	2.8	0.0	22.4
Case (b)	Large	Standard	Standard	7.7	-5.6	-0.6	-2.6	0.0	32.5
Case (c)	Standard	Short	Standard	-0.9	-4.7	0.2	0.3	0.0	27.3
Case (d)	Standard	Long	Standard	-0.6	-4.0	0.1	0.2	0.0	45.7
Case (e)	Standard	Standard	Low	-3.9	-10.5	0.3	1.3	1.5	28.7
Case (f)	Standard	Standard	High	-3.0	7.9	-0.4	1.0	-1.6	26.1

(a) Small-size frame for the average-size face

(b) Large-size frame for the average-size face

(c) Average-size frame for the short-depth face

(d) Average-size frame for the long-depth face

(e) Average-size frame for the face with ears at low position

(f) Average-size frame for the face with ears at high position

Fig.13 Results of the simulation using various shapes of face models (before and after simulation)

Fig.14 Results of the simulation for various types of faces and frames

(a) Before fitting

(b) Result by our simulation

(c) Result by a shop operator

Fig.15 Comparison between the results by our simulation and a shop operator