

原 著

## デジタルカメラを用いた切削技法評価システム構築に関する研究

木 村 一 水

Studies on the development of the system using a digital camera for  
the evaluation of cavity preparations

Kazumi Kimura

(平成16年1月7日受付)

## 緒 言

近年、歯科医学の進歩は目覚ましく、各種機器、新技術、新材料の開発が重ねられるにつれ、治療方法も多様化すると共に、患者の治療に対するニーズも高度化し多様化してきている。齲蝕に代表される歯の硬組織疾患は、自然治癒力のほとんどない疾患であり、歯の切削と生じた実質欠損に対する人工物による修復処置は基本的に避けて通れない処置行為である。歯学教育の中では講義、基礎実習、臨床実習等を含む保存修復学の占める時間数の割合は高く、保存修復学の基礎実習において、学生に基本的な窩洞の形状を理解させると共に、それを形成する切削技法を修得させるシミュレーション教育は歯学教育における重要課題の一つであり、臨床教育に入る前段階としてのファントムと規格人工歯を用いた基礎実習の果たす役割は重要である<sup>1)</sup>。

一般に保存修復学の基礎実習では、ファントムヘッドに装着した顎模型上の人工歯に各種の窩洞を学生に形成させている。このような技術教育を効果的に行うために治療姿勢、マネキンの改良、エアータービンの機能と窩洞形成や人工歯の改良等多くの研究がなされている<sup>2-6)</sup>。しかし、このような歯科臨床教育に先立って行なわれる模型実習の効果に対する客観的評価は容易でなく、教育指導者それぞれの主観と術者の目

視による評価に頼る方法で行われてきた。すなわち、基礎実習では、形成窩洞に対する切削の過不足部位の指摘や修正の指示事項は学生が形成した人工歯上で、目視と口頭指示により行われるため、指摘や指示事項を学生に十分正確に伝達するのは困難である。また、これらの指摘や指示事項は指導者の主観によって行われることが多く、指導者間では微妙な差が出ると共に、最終評価においてもバラツキが生じてしまうのが現状である<sup>2-3)</sup>。

しかし、限られた卒前教育の年限の中で、充分な歯科医療の基礎教育を行うことは容易でなく、効果的、能率的な教育システムを確立させることの必要性から、その方法論の抜本的な改革が模索されている<sup>4-6)</sup>。そこで、現在の歯科医学教育に求められるものは、これまでの連続、反復による経験的技術修得を一步進めて、客観的な評価法に基づく普遍的な教育の方法論の検討であると考えられる。

1908年に G. V. Black の提唱した概念<sup>7)</sup> に基づいて確立された窩洞分類は、多様な形態を示す硬組織疾患に対する治療法の一つとして長年臨床で応用されてきた。窩洞形成の主観的評価は、評価者の窩洞に対する考え方の差が出ることもあり、同一窩洞に対しても評価の異なる場合も時としてみられる。また、評価者の健康状態によって左右されたり、臨床経験の差によっても観点の異なる場合がみられる<sup>8)</sup>。これに関しては、経験年数が20年以上になると評価の整合性は高いとの報告もある<sup>8)</sup>。経験年数の長い指導者の不足は各大学共通の悩みでもあり経験の少ない指導者の指導に任せることも少なくないのが現状である。

荊木ら<sup>9)</sup> の「模型実習についてのアンケート調査」

広島大学大学院医歯薬学総合研究科展開医科学専攻顎口腔頸部医学講座(歯科保存学第一)(指導:新谷英章教授)本論文の要旨の一部は第35回広島大学歯学会総会(平成14年6月23日)において発表した。

にみられるように、マルチメディア教材による情報伝達や症例の提示も多くの分野で試みられている<sup>10-13)</sup>。

近年のコンピュータの進歩に伴って、歯科医療や教育の場にコンピュータを用いた手術支援システム<sup>14)</sup>やコンピュータ・シミュレーション・システム<sup>15-16)</sup>の応用が試みられてきており、コンピュータの応用による客観的な技能評価及び実習が行われつつある。歯の切削教育に関して、歯科学生の実習教育および歯科医師の技術向上を計るために、いくつかの歯科教育コンピュータ・シミュレーション・システムが開発されている<sup>15-28)</sup>。平田らは、窩洞形成技能システム<sup>29-32)</sup>を開発して、形成された窩洞とあらかじめ比較用にコンピュータに登録したマスター（手本）窩洞との適合度により評価する方法を考案し、すでに実習に取り入れている。そこで、より客観的かつ視認性にも優れた切削の適性を明示する安価なシステムの導入が急がれており、本研究では、窩洞情報の取得手段として、可視画像の視認性と再現性の双方に優れたデジタルカメラに着目し、切削技法評価システムとしての応用を目指すべく基礎的検討を行った。

本研究システムとしては、人工歯に形成された窩洞をデジタルカメラを用いて撮影し、デジタルデータとして得た画像データをパーソナルコンピュータ上で解析する方法を採用し、次の3つの項目について検討した。

研究1では、簡易計測を可能とするために幾何学的な位置補正の問題に関して、座標変換の有用性に関する検討を行った。

研究2では、アプリケーション作成のためのアルゴリズムに関する検討を行った。

研究3では、作成したアプリケーションの操作性に関する検討を行い、評価支援システムとしての計測を行った。

## 実験方法

### 1. 計測システム

本研究で採用した計測システムを図1に記す。すなわち、人工歯（A5A-500，ニッシン，京都）にI級メタルインレー窩洞を形成し、これをデジタルカメラ（D1，ニコン，東京）を用いて撮影し、その画像データをコンパクトフラッシュカードを介してパーソナルコンピュータに転送し、得られた画像データをパーソナルコンピュータ（VALUESTAR NX VC500J/2，NEC，東京）上でソフト的に解析した。カメラのレンズは接写リングを介した交換レンズ（ニッコール 135 mm，ニコン，東京）を使用した。パーソナルコンピュータのOS（オペレーティングシステム）はWin-



図1 本研究で採用したデジタルカメラを用いた計測システム

切削した人工歯をデジタルカメラで撮影し、その画像データをリムーバブルメディアを介してパーソナルコンピュータへと転送し、同コンピュータ上で解析する。

dows 2000, 数値解析ツールとして Excel 2000 のソルバーを使用した。

### 2. 座標変換

計測毎の変位を補正するために、基準点の座標を用いた最小自乗法による座標変換法を採用した。この手法を一般的に記すと次のようになる。すなわち、

$$p' = Rp + T + N \quad (*)$$

$$\sum^2 = \sum \{p' - (Rp + T)\}^2 \quad (**)$$

ただし、

$p'$  : 変換後の基準点の座標

$p$  : 元の基準点の座標

$R$  : 変換行列

$T$  : 平行移動のベクトル

$N$  : 計測誤差

とするとき、式(\*)に示すように観測された基準点  $p'$  は、元の基準点  $p$  が平行移動または回転したものとす。そのとき、計測誤差を  $N$  とすれば、最小自乗法により式(\*\*)の値が最小となるような変換行列  $R$ 、平行移動のベクトル  $T$  を求めることができる。

(1) カメラのレンズの光軸が鉛直方向の場合

この場合は、変換行列  $R$  は座標平面上での回転行列、ベクトル  $T$  は同一座標平面上での平行移動のベクトルとなる。すなわち、計測対象となる点がすべて同一平面上にあり、その平面に対して垂直に撮影する場合に相当する。

(2) カメラのレンズの光軸が鉛直方向と異なる場合

この場合は、変換行列  $R$  は以下の変換を含むものと

する。

- (i) 画像の伸縮の補正
- (ii) 画像の拡大・縮小の補正
- (iii) 画像の回転

すなわち、計測対象となるすべての点は同一平面上にあるが、その平面がカメラの光軸に対して傾いている場合である。以上の補正を行い、画像の変形に対する補正を行ってから平行移動のベクトルTを作用させることになる。

3. 座標変換の精度の計測

図2に示すように基準点、計測点を定義し、上記の座標変換を作用させた場合の精度を計測した。補正のための基準点は、隣接歯に設定した6つの点を用い、計測点は咬合面に設定した計9点とした。すなわち、咬合面の小窩の4点、及びそれらの小窩から頬側または舌側へ向かう溝が辺縁線縁に到達するまでの距離の2/3の点の5点、計9点である。

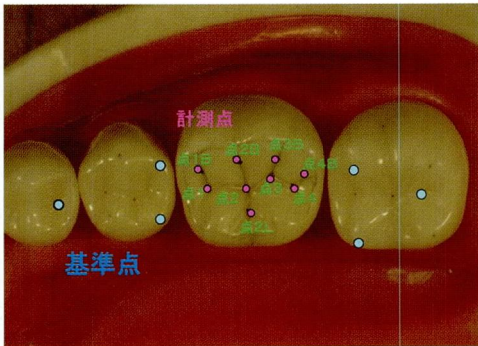


図2 座標変換のための基準点と座標変換の精度を計測するための計測点  
 図中、基準点を青点（隣接歯に設定した計6点）で示し、計測点（下顎第一大臼歯咬合面に設定した計9点）を赤点で示す。

(1) 平行移動・回転における補正精度

顎模型を水平な平面上で、近心、遠心、頬側、舌側の各方向へ 2 mm, 4 mm, 6 mm 変位させた場合に、カメラのレンズの光軸が鉛直方向になるように設定して撮影し、変位前の座標系に重なるように座標変換を施した場合の各計測点の変位を計測し、平行移動における座標変換の精度とした。また、同一平面上で顎模型を15度、30度、45度左右に回転させた場合の変位を計測し、回転における座標変換の精度とした。

(2) 変換行列の補正による効果

顎模型を水平な平面上に設置し、カメラの光軸が鉛直方向となす角度  $\alpha$  を0度から30度まで変化させた場

合に関して、 $\alpha = 0$ で計測した座標系に重なるように座標変換を施した場合の各計測点の変位を計測し、変換行列 R の補正の有無による変化を測定した。

4. アプリケーションのアルゴリズム

図3に示すように、本アプリケーションに採用したアルゴリズムは、ユーザーが操作するインターフェース層、各種演算処理とデータ保存を行うアプリケーション層/データベース層を分離した。両者は Windows 2000のマルチタスク機能を利用して独立した動作が可能であるが、後述するオブジェクト指向によりコマンドを内蔵したシステムファイルにより、連携して動作するように設定されている。これにより、入力内容はアプリケーション層/データベース層のデータシート内に保存され、演算処理が行われ、ユーザーは全ての操作（入力、データ参照）をユーザーインターフェース層で行うことが可能である。

アプリケーション使用に先立って、ユーザーは最初にシステム設定、すなわち、課題設定用のシステムファイルに基本情報としての「基準点の数」と「計測点の数」を入力する。次に、このファイルをコピーしてマスターファイルを作成し、同ファイル上に、基準点とマスター窩洞上に定義した計測点の入力を行う。同ファイルの内容は、計測時に参照される。

以上のように、定義された窩洞に対して計測対象となる窩洞情報を入力してコマンドを実行すると、入力された窩洞情報は演算部分に転送され、座標変換を含む数値解析が行われ、その結果をユーザーインター

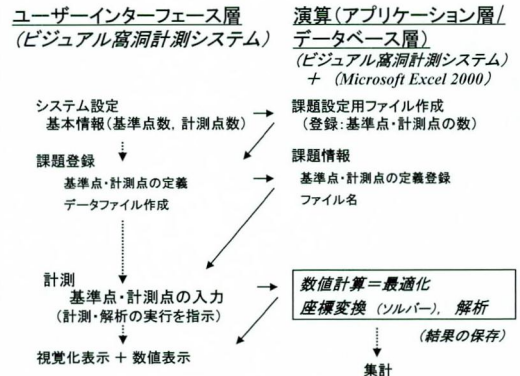


図3 『ビジュアル窩洞計測システム』のアルゴリズム  
 Windows のマルチタスク機能を利用して、ユーザーインターフェース層とアプリケーション層/データベース層が連携して動作する。システム設定から計測が行われるまでのアプリケーションの動作順序は実践で示した矢印となるが、画面上に表示される情報は点線で示した矢印のようになる。



フェース層へと再転送され、ここで計測結果として数値と画像による表示が行われる。

## 5. アプリケーションの作成

ユーザーインターフェース層のプログラミングには、Microsoft Visual Basic Ver 6.0 (Microsoft, Redmond, USA) を用いた。また、アプリケーション層/データベース層のプログラミングには、Microsoft Excel 2000 (Microsoft, Redmond, USA) を用い、同ソフト内蔵の関数並びに VBA 及び同ソフトにアドインされているソルバーを使用した。両者を Windows 2000 のマルチタスク機能によって並列動作が可能であるようにアプリケーションを試作し、『ビジュアル窩洞計測システム Ver 1.0』とした。

## 6. オブジェクト指向への対応

アプリケーション『ビジュアル窩洞計測システム Ver 2.0』では、安定動作と高速化のため、オブジェクト指向を採用した。その概念図を図 4 に示す。あらかじめ、解析時に行われるデータ転送、数値演算の各コマンドをシステムファイル内に内蔵し、システムファイルをコピーして作成するマスターファイル、さらにマスターファイルをコピーして作成するデータファイルへとそれらのコマンドが継承されるようにした。ユーザーインターフェース層とアプリケーション層/データベース層相互間のプログラム実行の指示はメッセージパッシングにより行うこととした。

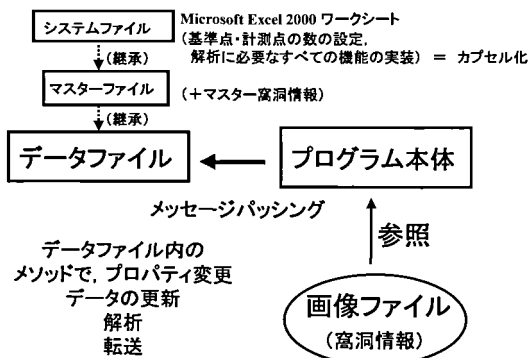


図 4 「ビジュアル窩洞計測システム」に採用したオブジェクト指向

更新、解析、転送などの必要なコマンド機能は、あらかじめシステムファイル内に内蔵する。これらは、アプリケーション実行時のデータファイルに「継承」され、プログラム動作時にはユーザーインターフェース層のコマンドからのメッセージパッシングにより起動する。

## 7. アプリケーションの動作速度

試作アプリケーションの動作に関して、以下の点に関して検討した。まず、アプリケーションの起動、画像読込、計測、結果表示、保存の各項目について、オブジェクト指向対応の場合と非対応の場合に関して所要時間を測定した。測定には、パーソナルコンピュータ本体 VALUESTAR NX 500 J/2 (NEC, 東京) にオペレーティングシステム Windows 2000 (Microsoft, Redmond, USA), Microsoft Visual Basic 6.0 (Microsoft, Redmond, USA), Microsoft Excel 2000 (Microsoft, Redmond, USA) を使用し、これらのソフトウェアをインストール直後に、試作アプリケーション『ビジュアル窩洞計測システム』、並びにデータファイルを転送し、測定を行った。

## 8. 基礎実習への応用

以上の検索方法が実際に基礎実習で応用できるかを検討した。基礎実習を終了した歯学部 4 年生 53 名を被検者とし、人工歯に I 級メタルインレー窩洞を形成させ、上記のシステムを用いて計測を行った後、データシートの集計機能を用いて集計した。

## 実験結果

### 1. 座標変換の精度 I

表 1 に平行移動における座標変換の精度を記す。各方向へ微小に変位させた場合にも 0.20 mm 以下の精度が得られることが判明した。また、表 2 に回転における座標変換の精度を記す。回転角が 15 度の場合、0.20 mm 以下の精度が得られることが判明した。

### 2. 座標変換の精度 II

カメラの光軸と鉛直方向とのなす角度を 0 度から 30 度まで変化させた場合の、計測精度のグラフを図 5～6 に示す。

図 5 に示すように、近心方向から撮影した場合、座標変換式に補正を加えることによって、角度  $\alpha$  が 10 度以下の場合に精度 0.20 mm が得られることが判明した。同様に図 6 に記すように、遠心方向から撮影した場合に関しても、角度  $\alpha$  が 10 度以下の場合に精度 0.20 mm が得られることが判明した。

### 3. 試作アプリケーションとその操作性

図 7 に試作アプリケーション『ビジュアル窩洞計測システム』の起動時の画面を、図 8 にアプリケーション起動後の画面を示す (基準点や計測点の数などのシステム設定と、マスター窩洞登録等の基本設定は終了しているものとする)。

表1 平行移動における座標変換の精度

	点1	点1 B	点2	点2 B	点2 L	点3	点3 B	点4	点4 B
変位なし	0.14	0.10	0.12	0.12	0.17	0.11	0.10	0.09	0.15
近心へ2 mm	0.10	0.08	0.05	0.09	0.11	0.05	0.09	0.05	0.07
近心へ4 mm	0.13	0.06	0.10	0.12	0.14	0.14	0.14	0.06	0.12
近心へ6 mm	0.10	0.06	0.08	0.05	0.11	0.09	0.05	0.11	0.05
遠心へ2 mm	0.12	0.04	0.06	0.07	0.12	0.05	0.07	0.06	0.07
遠心へ4 mm	0.15	0.07	0.07	0.10	0.09	0.11	0.06	0.07	0.11
遠心へ6 mm	0.12	0.09	0.07	0.08	0.16	0.06	0.09	0.05	0.10
頬側へ2 mm	0.06	0.11	0.05	0.11	0.11	0.13	0.16	0.15	0.21
頬側へ4 mm	0.08	0.05	0.06	0.08	0.07	0.16	0.14	0.10	0.31
頬側へ6 mm	0.02	0.11	0.12	0.12	0.20	0.08	0.12	0.12	0.17
舌側へ2 mm	0.03	0.11	0.03	0.11	0.21	0.08	0.08	0.09	0.16
舌側へ4 mm	0.07	0.18	0.04	0.03	0.08	0.10	0.09	0.06	0.03
舌側へ6 mm	0.06	0.13	0.10	0.02	0.19	0.12	0.10	0.04	0.14

表2 回転における座標変換の精度

	点1	点1 B	点2	点2 B	点2 L	点3	点3 B	点4	点4 B
-45度	0.14	0.37	0.09	0.40	0.08	0.28	0.43	0.15	0.21
-30度	0.09	0.25	0.07	0.30	0.15	0.07	0.27	0.16	0.06
-15度	0.09	0.09	0.09	0.16	0.13	0.05	0.15	0.06	0.11
回転なし	0.14	0.10	0.12	0.12	0.17	0.11	0.10	0.09	0.15
15度	0.08	0.20	0.12	0.15	0.11	0.25	0.31	0.08	0.20
30度	0.10	0.30	0.13	0.26	0.12	0.24	0.38	0.21	0.26
45度	0.12	0.39	0.09	0.35	0.10	0.36	0.40	0.24	0.31

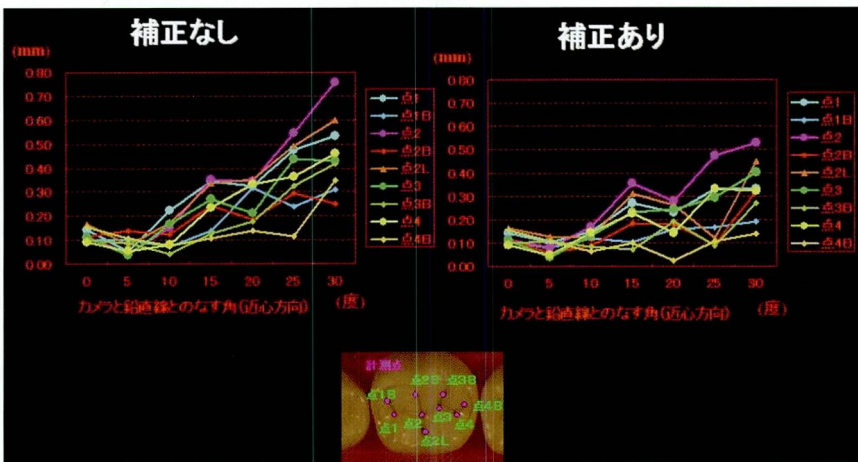


図5 偏向角（近心）の補正の有無による座標変換の精度  
補正を行わなかった場合は、偏向角が5度以下で、補正を行った場合は偏向角が10度以下で精度0.20 mmを得た。

画面は、ファイル名表示ボックス、サンプル番号表示ボックス、画像表示領域、ワークシート、コマンドボタンからなり、マウス操作またはキーボードからの入力により各種コマンドを実行することが可能であ

た。

計測対象となる窩洞の画像ファイルを読み込むと、ファイル名表示ボックスには読み込んだ画像のファイル名、並びに登録されているマスター窩洞のファイル

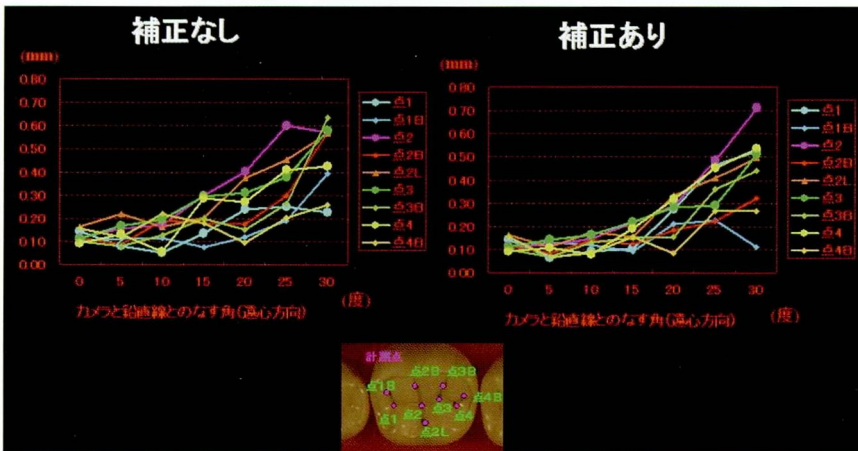


図6 偏向角（遠心）の補正の有無による座標変換の精度  
補正を行わなかった場合は、偏向角が5度以下で、補正を行った場合は偏向角が10度以下で精度0.20 mmを得た。

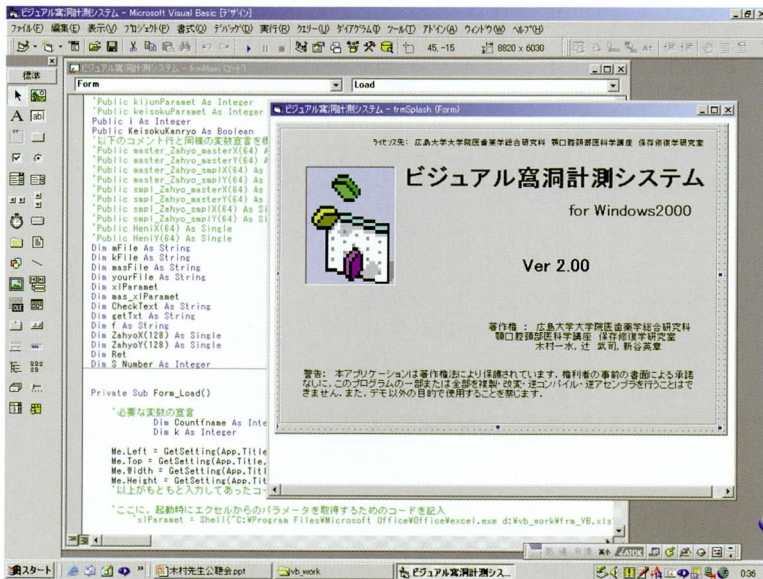


図7 『ビジュアル窩洞計測システム』の起動中の画面

名が表示され、その画像は画面中央に拡大表示された。画像が表示された領域をマウスでクリックすることにより、その座標が自動的に入力され、画面下のワークシート（システム設定に基づいて、自動的にフォーマットが作成・表示されている）に順に記録された。次に、ユーザーはサンプル番号を入力するが、これはユーザーが行う唯一のキーボード操作である。その後、画面の空白域をダブルクリック、または計測用コマンドボタンをクリックすることにより、解析用プログラムが起動され、自動的にエクセルで作成されたデータシートへデータが転送された。このデータシー

トには解析コマンドが内蔵されており、データ転送が終了すると座標変換を含む数値解析が自動的に行われた。

数値解析が終了すると、マスター窩洞座標系で表示された各点の座標が計算され、結果は同データシートに保存された。このデータは『ビジュアル窩洞計測システム』のユーザーインターフェース層へと転送され、結果が表示された。

基礎実習の終了した歯学部4年生が形成したI級メタルインレー窩洞に対して計測を行い、その結果を図9に示す。背景の窩洞はマスター窩洞、計測対象とす



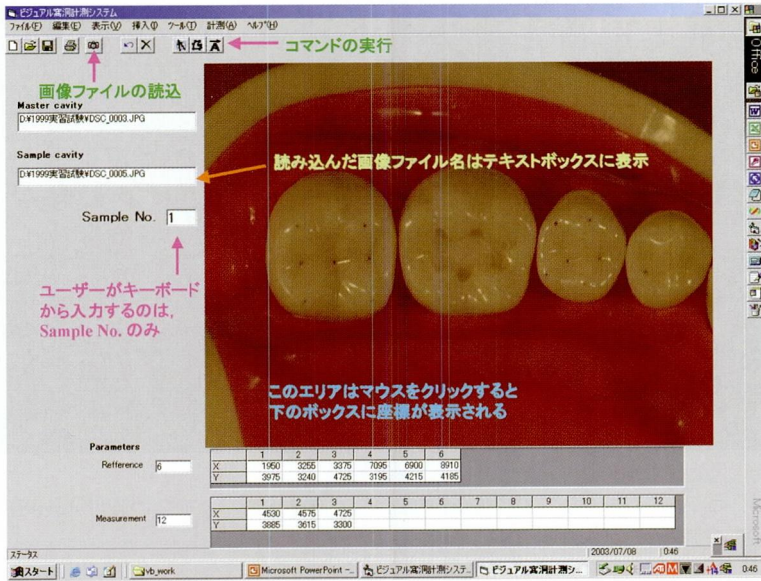


図8 『ビジュアル窩洞計測システム』の起動後の画面



図9 計測結果の『ビジュアル窩洞計測システム』上での表示  
図に示される赤い点はマスター窩洞に定義した計測点を示し、図に示される青い点は一学生の形成した一窩洞の相対する計測点を示す。

る窩洞をボタン一つで切り替えることが可能であり、マスター窩洞の計測点を小さい点で、計測対象となる窩洞の計測点を大きい点で表示した。また、マスター窩洞に対する計測対象となる窩洞の相対する計測点の変位が単位 mm を用いた数値で、画面下のワークシートに表示した。

以上のように、試作アプリケーション『ビジュアル窩洞計測システム』により、画像による視覚的表示（すなわち、視認性の向上）と数値による客観的表現が同時に可能であった。

表3 アプリケーションの動作速度：オブジェクト指向対応（00対応）とオブジェクト指向非対応（00非対応）

	起 動		画像読込	計 測			表 示	保 存
	1 回目	2 回目以降		転記	解析	合計		
00未対応	14.0(0.57)	5.0(0.17)	1.4(0.06)	18.4(1.38)	24.8(2.01)	43.2(2.61)	18.1(0.31)	13.8(1.08)
00対応	13.3(0.72)	4.4(0.31)	1.5(0.19)			22.4(1.69)	7.4(2.86)	10.3(0.59)

単位：sec, Mean (S. D.)

表4 歯学部4年生の形成した窩洞の集計結果

	Ax	Bx	By	Cy	Dx	Dy	Ex	Fy	Gx	Gy	Hy
大きさの平均	0.34	0.24	0.29	0.42	0.19	0.27	0.24	0.25	0.24	0.41	0.34
標準偏差	0.42	0.31	0.33	0.30	0.23	0.36	0.29	0.32	0.30	0.38	0.39
最 大	0.86	0.88	0.45	0.07	0.61	0.44	0.75	0.80	1.19	0.42	0.98
最 小	-0.88	-0.69	-1.13	-1.60	-0.46	-1.24	-0.61	-1.05	-0.51	-1.51	-0.72

(単位：mm)

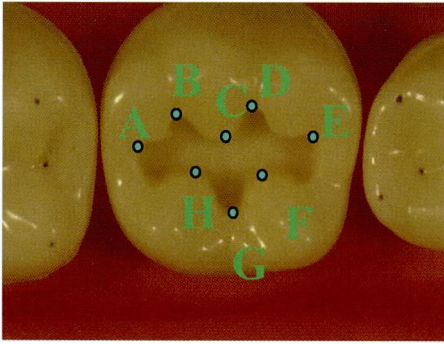


図10 表4の計測点  
学生が形成した窩洞における評価に用いた点を示す。

#### 4. アプリケーションの動作速度

アプリケーションの操作性に影響を及ぼす本計測システムの動作速度を計測した結果を表3に示した。オブジェクト指向（表中では「00」と表記）に対応することによって、基準点と計測点の入力等、ユーザーの指示による操作を除けば、平均41.6秒であり、ユーザー指示を含めても約1分間でソフトウェアによる全過程を終了することが可能となった。

#### 5. 集計結果

表4に試作したアプリケーションを用いて、基礎実習の終了した歯学部4年生53名が人工歯に形成したI級メタルインレー窩洞に対して計測を行い、エクセルのデータシートを用いて集計をした結果を示した。表4の計測点を図10に示した。

マスター窩洞との変位の大きさの平均は0.19 mm～0.48 mmであり、窩洞各部位により異なる値となっ

た。また、表4に示すように、Cyの値から点Cは多くの学生がマスター窩洞と比較すると頬側寄りに切削したことが判明した。

#### 考 察

接着歯学の進歩は目覚ましいものがあり、修復学の分野においても接着に対する考え方の変遷により、それらの要求にあった形での接着材料の研究や開発、さらに技法の改良等も行われている<sup>1)</sup>。それに伴って、従来より形成されてきた非接着性窩洞は臨床においてはその形成頻度が減少しつつあるのが現状である。しかし、保存修復学において窩洞についての基本的要件である基本形態やG. V. Blackの窩洞分類<sup>7)</sup>に応じて歯種、修復材料による窩洞形態がまず各大学で教育されている。形成された窩洞が適切に修復され、さらにその修復が長期にわたって維持されるためには6つの窩洞の条件<sup>7)</sup>を具備しなければならないと言われている。まず、適正な窩洞外形線を満たす窩洞が要求され、齶蝕象牙質を完全に除去した後に予防拡大、咬頭隆線の保存、円滑な曲線、審美的外形に留意して窩洞外形線を設定する。その後、適切な保持形態、十分な抵抗形態、必要な便宜形態、適正な窩縁形態などを考慮して形成される。歯科医療においては、エアータービンなどの高速切削器具の挿入方向が限定され、視野の確保もままならない口腔内という限られた環境下で精密な作業をしなくてはならず、患者の口腔内で安全にかつ正確に診療を行っていくための技能を修得するためには、基礎教育実習における技術訓練の繰り返しが重要なことである。

しかし、技術教育時間が減少しつつある現行のカリキュラムのなかで、複数回の同一タスクの実習を指導



者の指導のもとで、或いは自習の形で行うことは現状では困難であり、指導者の人数も限られたなかで、能率の良い実習が行われることが必要である。そのための基礎実習の内容や評価についてはさらなる検討が必要であることはいうまでもないが、実習の効果を高めるために指導者の主観に基づかない技能の習得度や技能の客観的な評価を行うことが求められており、さまざまな試み<sup>9-15)</sup>がなされている。

本研究は、客観的な評価手法の確立と実習の現場で容易に使用可能なツールとしてデジタルカメラに着目し、計測システムとしての応用の可能性に関して検討し、効果のあることを示した。

### 1. デジタルカメラの評価システムへの応用と座標変換

近年のパーソナルコンピュータの急速な発展と低価格化により、IT技術を駆使したシミュレーション教育を行うことが可能になりつつある。すなわち、窩洞形状をパーソナルコンピュータによりソフト的に解析することにより、優れた再現性と客観的な評価を可能とするものである。このような手法の一つとして、窩洞形状を画像化するために非接触高速三次元計測システム、すなわち半導体レーザーとCCDカメラを使用した光切断法により、三次元形状を非接触で高速に計測することができるもので、この方法<sup>16)</sup>はすでに歯科領域に応用されている。しかし、これらの方法は高価な器機が必要であり、多数の学生が同時に実習するという教育現場に応用することは困難である。

一方、最近の光学器機の小型化、高解像度化、デジタル画像の記録媒体の小型化・高容量化等と共に高性能化、低価格化により、可視画像の視認性と再現性に優れたデジタルカメラを画像取得手段として用いることが可能となった。デジタルカメラは、CCDにより画像情報を電子的に記録することが可能である。記録された画像データはパーソナルコンピュータにより、ソフト的に処理することが可能であるため、窩洞の客観的な評価が可能となる。また、レンズ交換式一眼レフカメラを使用すれば、使用するレンズシステムを最適化することにより、通常のアナログカメラと同様に任意の焦点距離において任意の大きさの画像を得ることが可能である。これは、多様な課題設定による複雑な計測条件に対応することが可能であり、実習現場への有効なツールとなり得ることを示唆している。

### 2. 座標変換

本方法は、レンズを介した非接触式計測法の一つであるが、その汎用性を発揮させるためには撮影ごとに

撮影条件の相違による被写体の位置並びに形状の変化を補正する方法<sup>33)</sup>が必要であり、本研究では、座標変換を用いた補正法を採用した。座標変換は、理論的にはガリレイ変換<sup>34)</sup>やローレンツ変換<sup>35)</sup>に見られるように、物理学の分野では日常的に行われている方法である。歯科の分野では、海原<sup>36)</sup>が接触法による小児の模型計測への応用に関して有効性を確認している。非接触法においても、座標変換の有用性が確認できれば、計測装置としてのカメラと被写体としての人工歯の位置関係を撮影毎に厳密に等しくするための高価で精巧な機器が不要となるため、実習現場で容易に使用可能な汎用的な計測システムとしてデジタルカメラを使用することがより可能となる。

そこで、

- (1) カメラ固定／被写体非固定の場合
  - (2) カメラと被写体のいずれも非固定の場合
- の条件における座標変換の精度を計測した。

#### (1) カメラ固定／被写体非固定の場合

この場合、カメラのレンズの光軸が鉛直方向の場合に相当し、被写体としての人工歯は顎模型に装着された状態で水平面上を任意に移動することが可能である。カメラの焦点距離に対して基準点、計測点の奥行きの変化が十分に小さいという仮定が成立するとき、基準点と計測点はすべて同一平面上にあると考えてよい。本研究で使用しているレンズの焦点距離は135 mmであり、それに対して咬合面の凹凸によるレンズの光軸方向における相違は小さいため、この近似が可能である。この場合の座標変換は、座標平面上における平行移動と回転により一意的に表現できる<sup>34, 37, 38)</sup>。二次元ユークリッド幾何の仮定、並びに不変性の仮定が成り立つものとした。

表1、表2に示すように、平行移動、回転により微小な変位が生じた場合でも計測誤差は0.20 mm以下であることが判明した。臨床において許容される精度は0.20 mmであり<sup>39)</sup>、座標変換の精度として0.20 mmが得られたということは、本手法が補正方法として使用可能であるということになる。すなわち、カメラに対しては固定が必要であるが、被写体としての人工歯基準点との位置関係が保存されている限り、厳密な固定が必要ではなく、水平面上に置いて上方から固定したカメラで撮影することにより、窩洞計測を行うことが可能となる。

#### (2) カメラと被写体のいずれも非固定の場合

この場合、カメラのレンズの光軸が鉛直方向と必ずしも一致しない場合も含めて補正されることとなる。水平面上に設置された顎模型上の人工歯は、カメラのレンズの光軸が鉛直方向からある方向に偏向するにつ

れ、その方向に対して変形して観測される。(1)の場合と同様に、カメラの焦点距離に対して基準点、計測点の奥行きの変化が十分に小さく、基準点と計測点はすべて同一平面上にあるとみなして良いならば、その画像の変形は、その画像の各部分間で一定と考えてよい。すなわち、被写体としての人工歯は、撮影方向に対して一定の比率で収縮して観測されることになる。もし、この収縮率をその方向も含めて推定することが可能であれば、本条件下においても補正が可能と思われる。

座標変換において、ある一定方向に収縮した画像の取り扱い、特殊相対性理論におけるローレンツ変換<sup>35)</sup>の例に示されるように線形表現が可能である。本システムにおいても、偏向角  $\alpha$  による収縮率は  $\cos \alpha$  となり、その方向角を  $\beta$  とすれば、画像をまず方向角  $\beta$  に相当する量だけ回転させて収縮方向に一致させ、その方向に対して収縮量に相当する  $1/\cos \alpha$  を乗じた後に、相似変換補正を行い、回転と平行移動を行う。すなわち、最後の平行移動を除いた部分はすべて線形であり、座標変換式(\*)の右辺第1項の変換行列 R で表現できる。言い換えれば、この補正法は変換行列 R の成分とベクトル T の成分を決定することと同値である。

図3、図4に示すように、偏向角  $\alpha$  が10度以下の場合においては、偏向による画像の変形を考慮した座標変換で補正を行うことにより、精度 0.20 mm を得ることが可能となった。このことは、被写体のみならず、カメラも非固定で使用した場合でも幾何学的位置関係の補正が可能であることを意味している。すなわち、偏向角  $\alpha$  が10度以下であるように使用する限り、十分な照明の下では手持ち撮影によりデジタルカメラを窩洞計測に使用することが可能となり、場所の移動による計測機器のセットアップ作業が不要な、極めて簡便な計測システムとして使用可能であることが判明した。

### 3. アルゴリズム

本研究では、アプリケーションの具備すべき条件として、良好な操作性、座標変換による補正、データの再現性を設定した。

一方、アプリケーション作成のためのソフトウェア設計法の一つに、ユーザーインターフェース層、アプリケーション層、データベース層の3層構造が推奨されることがあるが、本研究ではこの方法に立脚して、以下のような設計方法を採用した。

まず、良好な操作性が得られるようにするために、マウスの使用を中心とする操作体系を採用した。そのため、この部分をユーザーインターフェース層として独立させ、演算に必要なパラメータの取得と、演算結

果のパラメータに従って結果を表示する機能に特化した役割を担うようにした。

また、座標変換を行う部分は、複雑な数値計算を高速で行う必要があるため、数値計算ソフトとしての Microsoft Excel 2000 の関数を利用することにした。この部分は、アプリケーション層として、ユーザーインターフェース層とは独立してバックグラウンドで動作する。さらに、計測に必要な設定項目や、計測に必要なパラメータの保持と保存、計測結果の取得と保存はデータベース層が担うことになるが、この部分も Microsoft Excel 2000 のワークシートを利用することにした。したがって、データベース層とアプリケーション層は同一のワークシートを使用した。

すなわち、ユーザーインターフェース層で取得した情報は、まずデータベース層へ転送され保存される。ユーザーインターフェース層から「解析」の指示が出されると、アプリケーション層の解析コマンドが実行され、同コマンドは逐次データベース層から必要なパラメータを読み込み、座標変換などの演算を行った後、結果を再びデータベース層に保存する。その後、ユーザーインターフェース層から「解析結果表示」の指示が出されると、データベース層から結果を表示するのに必要なパラメータが読み込まれ、ユーザーインターフェース層に転送される。ユーザーインターフェース層ではそのパラメータを用いて視覚的に数値と画像を表示する。

以上の処理手順は、システム設定、マスター窩洞設定、窩洞計測のすべてに共通するものであり、それぞれの処理の記述を行うことにより、図3に示すようなアルゴリズムとなる。

### 4. オブジェクト指向

一般に、Windows アプリケーションはマルチタスク動作が可能であり、これにより処理の高速化とユーザーインターフェースの向上が見込まれる。しかしながら、マルチタスク動作の係数が不十分であると、動作中にアプリケーションがハングアップし、システムの破壊やデータ破壊の原因となることもある。したがって、複数のタスクを動作させる場合は、そのタスク間の連携を十分に考慮したプログラミングが必要である。

複数のタスクの連携には、OS (オペレーティングシステム) が直接タスクを監視する方法と、アプリケーションの角モジュール相互間にタスクの連携方法をあらかじめ設定する方法が存在する。最近のアプリケーションでは、Windows NT/2000/XP の下で両者を併用することが多くなってきた。

以上のようなソフトウェアの発展に先立って、各種プログラミング言語に各種の改良が加えられてきた。1979年に Bjarne Stroustrup によって考案された C++ 言語もその一つである<sup>41)</sup>。この C++ 言語の登場によって、オブジェクト指向プログラミングが可能となるに至った。すなわち、プログラミングの複雑さを解決するために、処理対象を適切な構成部品に分解し、分解した構成部品には、それぞれ必要なデータとそれを処理する関数(命令)を埋め込むことが可能となり、他の機能の助けを借りずに自己完結した動作が可能なプログラム単位となる<sup>42)</sup>。これらの単位は、あらかじめ決められた指示に従って起動するように構築されている。このような動作方法をメッセージパッシングといい、Visual Basic や Excel 2000 VBA を用いてプログラミングすることも可能となる<sup>42-44)</sup>。

本研究においた作成した『ビジュアル窩洞計測システム Ver 2.0』では、計測コマンド起動時に、ユーザーインターフェース層で取得したデータを一括して OS により管理されているメモリ内の変数にコピーすると同時に、アプリケーション層に対してメッセージパッシングを行う。これにより、Excel 2000 のマクロが起動され、変数にコピーされていたデータを取り込む。続いて、ワークシート内の所定の場所への記入、座標変換、結果の記入とカスケードに従って、一連の演算処理が行われる。これらは、すべて各構成部品内の処理が終了する毎にメッセージパッシングにより次の処理に対する指示が行われるため、処理が競合することなく高速に進行する。

一般的に、オブジェクト指向を採用したアプリケーションのほうが高速なメモリと CPU を必要とするが、表 3 に示すように、オブジェクト指向を採用している『ビジュアル窩洞計測システム Ver 2.0』のほうが、オブジェクト指向を採用していない『ビジュアル窩洞計測システム Ver 1.0』より高速に動作している。これは、オブジェクト指向を採用することにより、一連の演算処理を開始する場合に、最初のタスクに対するメッセージパッシングのみを行えばよく、常にタスクの監視を行う必要が無いためであると思われる。

以上より、オブジェクト指向を採用することにより、アプリケーションの動作速度の向上が可能であり、ツール全体の操作性向上にも寄与していると言える。

## 5. 実習支援ツールとしての有用性

本研究における試作ツールのうち、Excel 2000 のワークシートはデータベース層を兼ねているため、これを利用すると全体の集計や繰り返し回数を重ねる毎の変化を記録することが可能である。

今後、臨床基礎教育実習においてこのような医療情報支援器機の活用が積極的に用いられることが求められる。また、基礎実習や研修でモニターとして使用することにより、記録画像を使用して実習前後に指導教官と学生とが討論することが可能であり、さらに家庭での学生自身の予習、復習にも使用することができるので、基礎実習の効果を高めることが期待される。

現時点では、パーソナルコンピュータの演算処理能力上の制限に加えて、基盤となる理論的整備が必ずしも充分ではないことから、取り扱う窩洞データは二次元に限定しなければならなかったことも今後の課題として残されている。コンピュータビジョンの理論に基づいて窩洞の 3 次元計測を行うことにより、深さや方向の計測を行うことが可能であるが、そのためにはカメラの内部変数の算出、適切な近似法、並びに計測対象となる窩洞の窩縁並びに窩底の双方が明瞭に識別される複数枚の画像ファイルが必要である<sup>45)</sup>。今後、常にこれらの要求を満たすような条件が得られるシステム構築に関する検討を進めていくことにより、より有用な計測システムを確立させることが可能であると考える。

## 結 論

本研究では、可視画像の視認性と再現性に優れたデジタルカメラを用いて、切削技法評価システムとしての応用を目指すべく基礎的検討を行い、次の結論を得た。

1) デジタルカメラと窩洞形成の終了した人工歯を固定すると、切削評価システムとして応用が可能であることが判明した。

2) 座標変換を用いることにより、非接触式計測法から由来する微小な変位を補正することが可能であることが判明した。さらに、座標変換式を拡張することによって、カメラを固定しない、すなわち焦点距離や撮影角度が微小に変化する条件下においても補正が可能であることが判明した。このことから、手持ち撮影を含む簡易な計測が可能であることが示唆された。

3) アプリケーションのアルゴリズムに対する検討の結果、ユーザーが操作する部分と数値解析を行う部分を分離し、双方の連携動作により円滑な動作が可能であることが判明した。

4) オブジェクト指向とマウス操作を中心とする操作方法を採用した結果、試作アプリケーションによる全行程は一窩洞当たり約 1 分間で終了した。

5) 基礎実習を終了した歯学部 4 年生に I 級メタルインレー窩洞を人工歯に形成させ、本法を用いてその計測を行った結果、指導者、術者の双方にとって視認性



の向上が得られると共に、数値化による客観的評価が可能であった。

6) データの再現性に優れていることから、記録画像を使用して実習前後における学生の予習、復習にも使用可能であることが示唆された。

以上より、本研究で採用したデジタルカメラ、顎模型、パーソナルコンピュータからなる計測システムは、機器構成が簡単で安価なシステムであるとともに、高速かつ操作性に優れており、客観的かつ視認性に優れた切削技法評価システムとして、保存修復学基礎実習支援ツールへの有効利用が可能であることが示唆された。

## 謝 辞

稿を終えるにあたり、本研究の遂行および論文作成上、終始御懇篤なる御指導ならびに御校閲を賜りました本学大学院医歯薬学総合研究科展開医科学専攻顎口腔頸部医科学講座新谷英章教授に深甚なる謝意を表します。また、御校閲を賜りました本学大学院医歯薬学総合研究科創生医科学専攻先進医療開発科学講座栗原英見教授、ならびに広島大学病院口腔総合診療科小川哲次教授に深謝致します。研究遂行上、多大な御指導と御鞭撻を頂きました本学大学院医歯薬学総合研究科展開医科学専攻顎口腔頸部医科学講座辻 武司博士に厚くお礼申し上げます。

さらに、御支援、御協力を頂きました本学大学院医歯薬学総合研究科展開医科学専攻顎口腔頸部医科学講座（保存修復学研究室）、広島大学医学部・歯学部附属病院口腔維持修復歯科（むし歯・変色歯診療科）の先生方に感謝致します。

## 文 献

- 1) 田上順次：新しい齲蝕学・修復学の教育体系，新しい齲蝕学・修復学を求めて。補綴臨床別冊 19-25, 1997.
- 2) 佐藤禎子，畑 芳明，横内厚雄，平本正樹，永井康彦，野田晃宏，豊岡広起，長岡 央，尾立達治，大沼修一，山本淳子，原口克博，川上智史，荊木裕司，松田浩一：歯科保存学実習における項目別窩洞形成評価—第2報93年度と94年度の比較について。東日本歯学誌 14, 81-88, 1995.
- 3) 畑 芳明，亀谷禎子，横内厚雄，豊岡広起，荊木裕司，松田浩一：歯科保存学実習における項目別窩洞評価—93年度から96年度における窩洞の自己評価の推移—。東日本歯学誌 17, 33-44, 1998.
- 4) 篠原正氣：プログラム・ビジュアル学習方法とその評価。GP 1, 149-159, 1977.
- 5) 篠原正氣，大野昌蔵，垣内英也，井上時雄，西原泰，富本暁子，中田孝子，正法地孝雄，小村安

幸：多変量解析によるプログラム学習方法の評価。GP 6, 29-48, 1978.

- 6) 江島恒章，西原 泰，垣内英也，山村 剛，山岡敏行，内藤真里子，篠原正氣，井上時雄：作業動作のシステム化における窩洞形成の評価について。日歯保存誌 22, 84-95, 1979.
- 7) 岩久正明，河野 篤，千田 彰，田上順次監修：保存修復学 21. 改訂版。永末書店，京都，85-92, 2002.
- 8) 川本雅行，北野忠則，川人照美，恩地美弥，河見忠雄，井上正義，成川公一，藤井弁次：歯科保存学実習における窩洞の自己評価—アマルガム2級窩洞の評価基準の教員間の差—。日歯教誌 9, 182-189, 1994.
- 9) 荊木裕司，原口克博，塚越 慎，尾立達治，永井康彦，齊藤隆史，川上智史，小林文人，松田浩一：シミュレーションシステムの導入による歯学臨床教育の合理化・能率化—コンピュータ支援自立型学習システムの保存修復学実習への応用—。日歯保存誌 45, 52-61, 2002.
- 10) 川本達夫：歯学教育におけるコンピュータの利用。日歯教誌 11, 97-100, 1995.
- 11) 川本雅行，北野忠則，川人照美，恩地美弥，河見忠雄，井上正義，成川公一，藤井弁次：効果的な学習教材への三次元コンピュータグラフィックスの応用（第1報）インレー窩洞のベベル付与を題材とした教材の試作。日歯教誌 11, 101-107, 1995.
- 12) 権田知也，前田芳信，野首孝嗣：歯科補綴学臨床教育支援のためのマルチメディアシステム。阪大歯学誌 42, 148-153, 1997.
- 13) 倉地裕治：窩洞形成の客観的評価法について—2級窩洞について—。鶴見歯学 1, 95-107, 2002.
- 14) Johnson, L., Thomas, G., Dow, S. and Stanford, C.: An initial Evaluation of the Iowa Dental Surgical Simulator. *Journal of Dental Education* 64, 847-853, 2000.
- 15) 子田晃一，鮎川幸雄，岩久正明：臨床シュミレーションシステムへのコンピュータの導入 第一報 回転切削器具適正回転数および形成窩洞の評価法。日歯保存誌 37 (秋季特別号), 152, 1994.
- 16) 山本宏治，近藤和生，青野正男：ダリル・ビーチ，自己評価のできる朝日大学型デンタルシュミレーターを用いた臨床前の学生実習について。日歯教誌 9, 87-95, 1993.
- 17) 川人照美：窩洞形成シュミレーション装置の開発に関する研究 特にハンドピースのコントロールと切削荷重について。日歯保存誌 37, 1406-1426, 1994.
- 18) 堀田正人：臨床シュミレーションシステムによる切削実習教育について。人間工学 31, 105-109, 1995.
- 19) 渡邊芳明：臨床実習へのシュミレーションシステム導入の現況。人間工学 31, 97-100, 1995.
- 20) 高瀬保品，石川達也：保存修復におけるシュミレー

- ション, クインテッセンス 14, 2453-2458, 1995.
- 21) 子田晃一, 岩久正明: 歯科臨床教育における効果的シミュレーションシステム導入 第一報 コンピュータの応用. 日歯教誌 10, 61-65, 1994.
  - 22) 安永哲也, 加藤節子, 高岡晃行, 西 真紀子, 三浦将文, 恵比須繁之: 1級インレー窩洞における主観的評価の均一化. 第7回デンタルシミュレーション研究会 (DSTS) 研究発表論文集 91-98, 1997.
  - 23) 岩久正明: 歯科教育における効果的シミュレーションシステムの導入. *Academy of Performance Logic for Oral Health* 8-11, 1995.
  - 24) 牧野久史, 鮎川幸男, 今村麻枝男, 林 敬人, 子田晃一, 岩久正明: 臨床シミュレーションシステムへのコンピュータの導入—第2報 歯内療法実習への応用—. 日歯保存誌 40 (春季特別号), 123, 1997.
  - 25) Suvinen, T. I., Messer, L. B., Franco, E.: Clinical simulation in teaching preclinical dentistry. *European Journal of Dental Education* 2, 25-32 1998.
  - 26) 富田文仁, 牧野久史, 子田晃一, 岩久正明: 臨床シミュレーションシステムへのコンピュータの導入—臨床予備実習への応用とその評価—. 新潟歯学誌 31, 141-145, 2001.
  - 27) Buchanan, J. A.: Use of simulation technology in dental education. *Journal of Dental Education* 65, 1225-1231, 2001.
  - 28) Grimes, E. B.: Student perception of an online dental terminology course. *Journal of Dental Education* 66, 100-107, 2002.
  - 29) 平田健一, 中嶋正人, 井村清一, 田口尚幸, 山本宏治, 関根一郎, 森脇 豊: 窩洞形成評価システムの運用評価. 日歯教誌 14, 205-211, 1999.
  - 30) 平田健一, 中嶋正人, 井村清一, 山本宏治, 関根一郎, 森脇 豊, 吉田定宏: 非接触高速三次元計測システムの歯科保存領域への応用 第1報: 窩洞形成に対する測定精度. 日歯保存誌 40, 287-297, 1997.
  - 31) 平田健一, 中嶋正人, 井村清一, 山本宏治, 関根一郎, 森脇 豊, 吉田定宏: 非接触高速三次元計測システムの歯科保存領域への応用 第2報: 窩洞形成評価システムの開発. 日歯保存誌 41, 320-336, 1998.
  - 32) 平田健一, 中嶋正人, 井村清一, 山本宏治, 関根一郎, 森脇 豊, 吉田定宏: 非接触高速三次元計測システムの歯科領域への応用 第3報: 形成窩洞の点数評価. 日歯保存誌 41, 337-342, 1998.
  - 33) 辻 武司, 田中信征, 瓜生 賢, 占部秀徳, 富士谷盛興, 新谷英章: シミュレーション教育における画像数値解析に関する研究—計測と最適化法の諸問題について—. 第8回デンタルシミュレーション研究会 (DSTS) 研究発表論文集 65-71, 1998.
  - 34) Kittel, C. Knight, W. D. and Runderman, M. A.: バークレー物理学コース1—(上) (今井 功監訳). 丸善, 東京, 6-163, 1975.
  - 35) Kittel, C. Knight, W. D. and Runderman, M. A.: バークレー物理学コース1—(下) (今井 功監訳). 丸善, 東京, 395-422, 1975.
  - 36) 海原康孝: 三次元模型計測システムによる日本人小児の歯列および咬合の形成過程に関する研究. 広歯誌 27, 69-98, 1994.
  - 37) Lang, S.: Basic Mathematics. Springer, New York, USA, 345-374, 1998.
  - 38) Tsuji, T., Kimura, K., Tanaka, N., Fujitani, M. and Shintani, H.: The applicability of digital camera as component device of dental simulation training system for cavity preparations—Evaluation of the performance of a newly-developed software—. *IEA2003 Proceedings* 6, 206-209, 2003.
  - 39) パフォーマンスロジック (歯科) 学術記録集「ゼロからの軌跡」. システムプランニング, 京都, 1-235, 1988.
  - 40) 林晴比古: 新 C++ 言語入門ビギナー編. ソフトバンク, 東京, 2-3, 2001.
  - 41) 林晴比古: 新 C++ 言語入門シニア編. ソフトバンク, 東京, 19-22, 2001.
  - 42) 林晴比古: 新 Visual Basic 入門ビギナー編. ソフトバンク, 東京, 1-350, 1998.
  - 43) 林晴比古: 新 Visual Basic 入門シニア編. ソフトバンク, 東京, 1-473, 1998.
  - 44) アスキー書籍編集部編: Excel VBA 2000リファレンス. アスキー出版局, 東京, 1-1175, 1999.
  - 45) 徐 剛: 写真から作る3次元CG. 近代科学社, 東京, 7-19, 2001.