

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 20 日現在

機関番号：34412

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360109

研究課題名（和文）汎用の GPGPU やハプティクスを利用した先端歯科オペレーションシステムの構築

研究課題名（英文）Construction of Advanced Dental Operation System using Commercial-Based GPGPU and Haptics

研究代表者

登尾 啓史（NOBORIO HIROSHI）

大阪電気通信大学・総合情報学部・教授

研究者番号：10198616

研究成果の概要（和文）：

この研究では、まず、GPGPU の並列処理と Z バッファの機能を利用して、デンタルバーと歯のめり込み領域を計算することで、歯を高速に切削（力やモーメントも同時に決定）する。次に、デンタルタービンを 3D プリンタで成形し、それを 2 台の商用ハプティクス間に配置し、本当の治療行為と同様な操作性が得られるようにした。最後に、3 次元ステレオ映像を医師の膝元へ鏡面反射させて、医師が患者を実際に診療するのと同じ姿勢で各種の歯科施術ができるようにした。

研究成果の概要（英文）：

In this research, using parallel processing and Z-buffer in GPGPU, we calculate an intersection between a tooth (several kinds of hard and soft materials in the tooth) and a dental bar, and then cut the tooth (and also determine force and moment) by the bar efficiently. Secondly, we construct a dental tool such as a bar by a 3-D printer, and we can get several kinds of real operations by the tool between two commercial-based tactile feedback devices. Finally, 3-D stereo image of tooth and bar is reflected front the doctor by a transparent mirror. Consequently, the doctor can operate several dental surgeries in the virtual world as same as he/she does in the real world.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2012年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
年度			
年度			
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム・情報システム

キーワード：GPGPU, 複合現実感, シミュレータ, 歯科教育, 並列処理, Z バッファ

1. 研究開始当初の背景

この研究を開始当初の状況としては、ゲームやエンタテインメントの分野の隆盛より、グラフィックスアクセラレーションボードの高機能化が急速に進み、3次元空間処理の並

列処理プロセッサとして GPGPU が汎用的に利用されるようになってきた。一方、医科・歯科などの医療現場におけるシミュレータやナビゲータとしては、脳神経外科、および耳鼻咽喉科の様に“平行回転運動”や“変形”

のない臓器では実用化されつつあるが、それ以外の移動や大変形の生じる臓器に関してはほぼ手つかずの状態であった。

我々は、歯科という同じく“平行回転運動”や“変形”のない生体組織を対象として、歯科医師が患者を診察するリアリティのある教育用シミュレーションシステムの構築を目指した。歯科の分野でも、いくつかの先行研究は存在したが、いずれも完成度が低く、特にヒューマンインタフェースの観点からはほとんど見るべきものがなかった。

2. 研究の目的

(1) 触覚や視覚のリアリティを保持した歯の切削シミュレータの構築：まず、すべての剛組織（エナメル質や象牙質など）を CT スキャナ装置で撮影し、それらを STL フォーマット（三角面多面体）に変換する。そして、その STL を GPGPU の並列処理機能および Z バッファ機能を利用して処理し、デンタルバーと歯のめり込み領域を並列で高速に計算する。次に、それらのめり込み領域を利用して、高速な歯の切削を実現する。さらに、エナメル質、象牙質など毎にめり込み体積を求め、それらと衝突時の速度をフォークトモデルで処理し、衝突力や切削領域を決定する。

(2) 2 台の商用ハプティクスを接続した実際の歯科治療行為に近い操作感が得られる歯科オペレーションシステムの試作：ここでは、商用ハプティクス（各々、3 自由度の力提示が可能）を複数台接続して利用する。デンタルタービンなどの歯科施術で用いる器具に似せたモデルを 3D プリンタで成形し、これを連結用ツールと共に 2 台のハプティクスの間に配置して接続し、実際の歯科施術に近い操作感が提示できる歯科オペレーションシステムを構築する。このとき、2 台のハプティクスの相対位置姿勢は多数の位置を正確に指定できるキャリブレーションボックスを利用して推定する。また器具の先端位置までの距離は、先端位置を点固定した状態で得られる複数の 3 次元座標を球面フィッティングさせることで推定する。

(3) 医師が患者を実際に則して治療できる膝前表示システムの製作：3 次元歯科モデルによる切削シミュレータの表示ディスプレイを医師の膝元へ鏡面反射させて、医師が患者を実際に診療する場合と同じ姿勢で各種の歯科施術ができるようにする。さらに、医師が薬指を治療している歯とは別の歯に置いて、それを支点として施術する、いわゆるレストを実際の歯列で取りながら、仮想の歯を削ることができるようにする。これより、現実に即した各種の歯科施術の練習が可能にする。

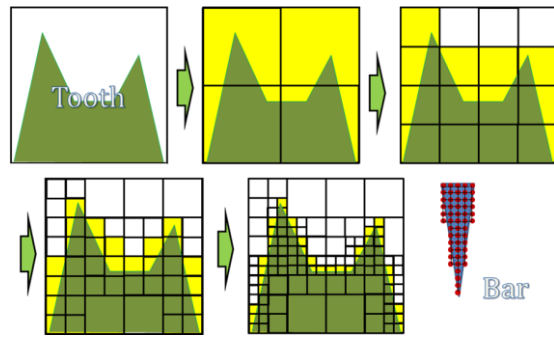


図 1 STL から変換されたオクトツリー歯と点群で表現されたデンタルバー

3. 研究の方法

(1) まず、CT スキャナ装置で撮影した歯やデンタルバーの DICOM データを STL に変換し、さらに歯はオクトツリー、デンタルバーは点群に変換する（図 1）。そのようにして変換された歯（エナメル質、象牙質、歯髄）および複数種類のデンタルバーが図 2 である。

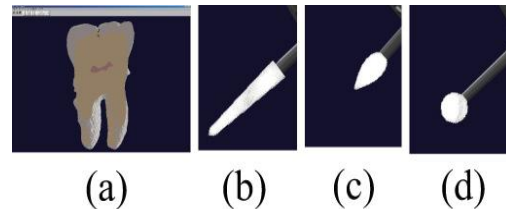


図 2 (a) エナメル質・象牙質・歯髄のオクトツリー, (b), (c), (d) 各種デンタルバー

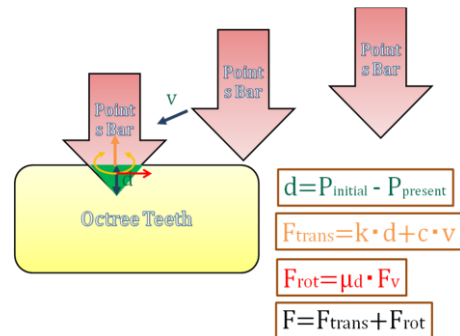


図 3 干渉領域からの力の決定、および力の垂直抗力と動摩擦係数によるモーメントの生成

これらのモデルを利用して、歯とバーの干渉を高速にチェックする。このとき、初期接触点、最終先端点、エナメル質、象牙質、歯髄と干渉するバーの点数の分布より、切削領域、および切削力の方向を決定する。次に、切削力の大きさをフォークトモデル（めり込み距離 d と接触速度 v を各々弾性係数 k と粘性係数 c で処理したもの）、およびその垂直効力 F_v と動摩擦力 μd から、切削モーメントを計算する（図 3）。

(2) ハプティクスに取り付ける器具の先端位置を推定するための新たな手法を考案した。本手法では、まずハプティクスに取り付けた器具の先端をある

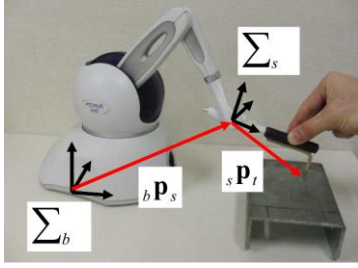


図4 先端位置計測方法

点に点接触させた状態にする(図4)。器具を動かし、その時ハプティクスから得られる3次元座標群は必ず球面上に配置されるという拘束条件を用いて先端位置を計算するものである。

得られた点群を ${}^b\mathbf{p}_s = (x_i \ y_i \ z_i)^T$ 、球面の中心座標 $\mathbf{x}_c, \mathbf{y}_c, \mathbf{z}_c$ と半径 r (器具先端までの距離) とすると、以下の式で求めることができる。

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c & r^2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\frac{a}{2} & -\frac{b}{2} & -\frac{c}{2} & \frac{a^2+b^2+c^2-d}{4} \end{bmatrix}^T$$

$$\begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N x_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i^2 z_i^2 & \sum_{i=1}^N x_i & -\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) x_i \\ \sum_{i=1}^N y_i^2 z_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i^2 z_i^2 & \sum_{i=1}^N y_i & -\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) y_i \\ \sum_{i=1}^N z_i^2 x_i^2 & \sum_{i=1}^N z_i^2 y_i^2 & \sum_{i=1}^N z_i^2 & \sum_{i=1}^N z_i & -\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) z_i \\ \sum_{i=1}^N x_i & \sum_{i=1}^N y_i & \sum_{i=1}^N z_i & N & -\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2 + z_i^2) \end{bmatrix}^{-1}$$

歯科医は歯科施術時に、デンタルタービンを持つ手の薬指で支えを作り、手先の安定性を高める操作(レスト)を行っている。ここでは、連結棒の $\alpha:(1-\alpha)$ の位置にレストがある場合を考える(図5)。

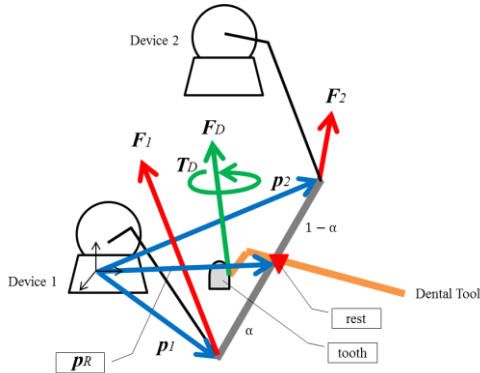


図5 座標系と各配置

レスト位置 \mathbf{p}_R はそれぞれのデバイスのスタイラス先端位置 $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2$ を用いて

$$\mathbf{p}_R = (1-\alpha)\mathbf{p}_1 + \alpha\mathbf{p}_2$$

となる。デンタルタービンが仮想空間から受ける力とトルクをそれぞれ $\mathbf{F}_D, \mathbf{T}_D$ とする

と、これらを擬似的に表現するために、両ハプティクスの力 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ で分散して出力させる。この際 $\mathbf{F}_1, \mathbf{F}_2$ は以下の式に基づいて導出する。

$$\mathbf{F}_1 = \frac{1}{2}(\mathbf{F}_D) + (1-\alpha)|T_D|(\mathbf{p}_{R1}^n \times \mathbf{T}_D^n)$$

$$\mathbf{F}_2 = \frac{1}{2}(\mathbf{F}_D) + \alpha|T_D|(\mathbf{p}_{R2}^n \times \mathbf{T}_D^n)$$

ここで $\mathbf{T}_D^n, \mathbf{p}_{R1}^n, \mathbf{p}_{R2}^n$ はそれぞれ $T_D \cdot \mathbf{p}_R - \mathbf{p}_1,$

$\mathbf{p}_R - \mathbf{p}_2$ を正規化したベクトルである。図6にシステム稼働時の様子を示す。



図6 システム全体像

(3) 提案する膝前提示型歯科シミュレータのイメージを示す

(図7)。

本システムでは、

患部

周囲

の歯

科モデル

と患部のCGモデル

を重畳表示

するために、

ハーフミラー

を利用する。また

ユーザの視点位置

に応じたCGモデル

を表示するために、

ユーザ頭部と実歯科

モデルの位置を3次元位置計測装置にて計測する。ユーザは

任意の視点位置からハーフミラーを覗き込む形で重畳表示された物体を視認し、ハーフミラー下部の実物体に触れる形で作業を実施することで、実際の歯科手術の姿勢と手の位置を再現しながら手術訓練を可能にする。

実

歯

科

モデル

と仮想

歯科

モデル

の重畳

表示の

様子を

図8に

示す。

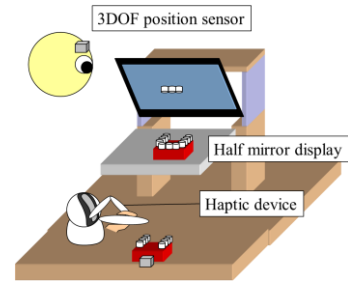


図7 膝前提示型ディスプレイ概

科モデルと患部のCGモデルを重畳表示するために、ハーフミラーを利用する。またユーザの視点位置に応じたCGモデルを表示するために、ユーザ頭部と実歯科モデルの位置を3次元位置計測装置にて計測する。ユーザは任意の視点位置からハーフミラーを覗き込む形で重畳表示された物体を視認し、ハーフミラー下部の実物体に触れる形で作業を実施することで、実際の歯科手術の姿勢と手の位置を再現しながら手術訓練を可能にする。

実

歯

科

モデル

と仮想

歯科

モデル

の重畳

表示の

様子を

図8に

示す。

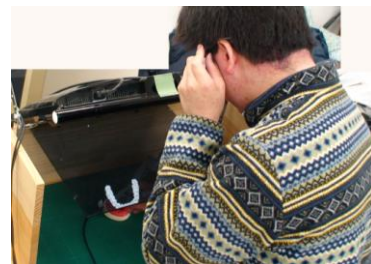


図8 システム実行例

ハーフミラー上部に設置したディスプレイに表示された仮想の歯科モデルと、ハーフミラー下に設置されている実歯科モデルを重畳させる。また、この際に前述した位置計測装置によって測定された頭部位置と、実歯科モデルの位置情報を基に仮想空間のカメラ座標系に関するプロジェクション行列をリアルタイムに生成することで、任意の視点位置に基づいた仮想歯科モデルを表示する。

4. 研究成果

(1) 歯を切削するオペレーションと切削しないオペレーションを実施したが、紙面の都合上、歯を削るオペレーションの計算時間の変遷グラフ、および力やモーメント

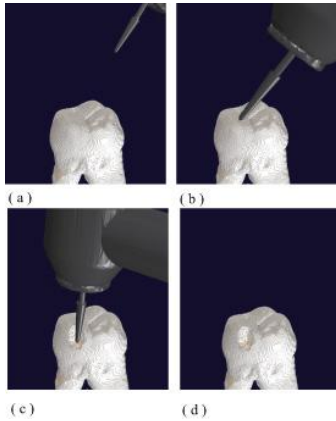


図9 歯を切削するオペレーション

の変遷グラフのみ掲載する(図9)。このときの計算時間と切削力の変遷グラフを図10に示す。1N以内の微小な力が連続的に

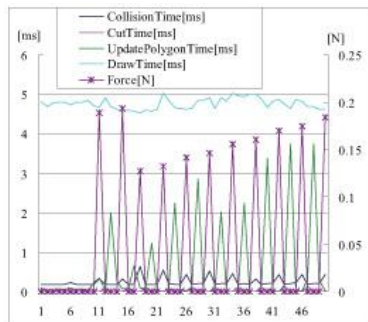


図10 計算時間や切削力の変遷グラフ

生成しており、それに要するアルゴリズムの計算時間も数ミリ秒で完了していることから、視覚のリアリティはもちろん、触覚のリアリティも十分維持されることが分かった。



図11 計測中のスナップショット

(2) 先端位置計測実験時の様子を図11に示す。また得られた点群の例を図12に示す。実測113[mm]の器具を使って、本手法に

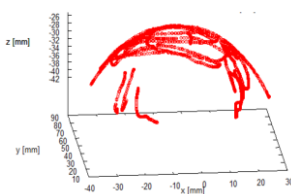


図12 点群の例

より複数回計測した場合の平均誤差は1[mm]以下となり、高い精度で推定が可能であることが分かった(図13)。

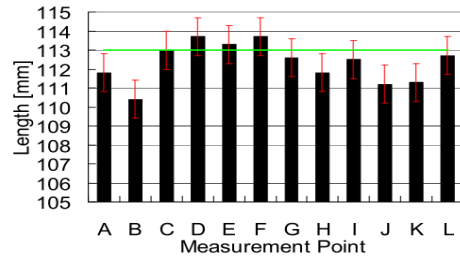


図13 先端位置計測実験の結果

(3) 提案する膝前提示型ディスプレイについて図7にその外観を示す。提案するシステムはWindows上に実装し、21.5inchの液晶ディスプレイを利用した。実装システムでは、Polhemus社製磁気式位置計測装置Fastrakを用いて、ユーザの視点位置に対応する頭部の位置と、実歯科モデルの位置を計測する。これらの計測結果に基づき、3次元仮想歯科モデルを表示するためのプロジェクション行列を計算し、ユーザの任意の視点位置に応じた表示を行った。

本システムの確認実験として、実立方体と3次元CGによる立方体モデルを利用したユーザ視点からの位置誤差について測定した。実立方体と同サイズに表示できる3次元CGによる立方体を重畳表示し、ユーザの視点方向を水平方向に移動し、数点において実物体と3次元CGモデルのユーザ視点から見た際の表示位置誤差を測定した。その結果、ディスプレイ端付近で表示した場合に最大で約0.5cmの表示誤差を確認した。実際の歯科手術では患部を確認する上で視点位置は大きく動かないことから、実際の歯科手術での姿勢を保った上で本システムを利用できる可能性があることを確認できた。

5. 主な発表論文等(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

- ① Yamaguchi S, Noborio H, et al, Development of three-dimensional patient face model that enables real-time collision detection and cutting operation for a dental simulator, Dental Materials Journal, 有, 31, 2012, 1047-1053, DOI:10.4012/dmj.2012-164.
- ② Yamanishi Y, Yamaguchi S, et al, Influence of implant neck design and implant-abutment joint type on peri-implant bone stress and abutment micromovement: three-dimensional finite element analysis, Dental

Materials, 有, 28, 2012, 126-1133 DOI: 10.1016/j.dental.2012.07.160.

- ③ Onishi K., Noborio H., et al, Development of AR Display System for Dental Surgical Simulator, Communications in Computer and Information Science, 有, 174, Part II, 2011 130-133. DOI:10.1007/978-3-642-22095-1_27.
- ④ Yoshida Y., Yamaguchi S., Kawamoto Y., Noborio H., Murakami S., Sohmura T., Development of a Multi-Layered Virtual Tooth Model for the Haptic Dental Training System, Dental Materials Journal, 有, 30-1, 2011, 1-6, DOI: 10.4012/dmj.2012-164.
- ⑤ 登尾啓史, 山口哲, 他, 複合現実感を用いた歯科シミュレータにおけるヒューマンインタフェースソフトウェアの開発, VR 医学, 有, 8-1, 2010, 11-22 J-GLOBAL ID : 201102270622744730 整理番号 : 11A1659761.

[学会発表] (計 23 件)

- ① 海堀昌樹, 小枝正直, 大西克彦, 登尾啓史, 他, 肝臓切除手術における医工学部連携先進的ナビゲーションシステムの開発 2012 年度日本消化器関連学会週間 2012.10.10-13, 神戸市
- ② 山西康文, 山口哲, 中野環, 今里聡, 矢谷博文, インプラントデザインの違いがインプラント周囲骨の応力分布に及ぼす影響, 第 42 回日本口腔インプラント学会・学術大会, 2012 年 9 月 22 日 大阪市
- ③ 津田匠, 小枝正直, 大西克彦, 登尾啓史, 他, 医工学部連携による肝臓手術ナビゲーションシステムの開発と応用, 第 112 回日本外科学会定期学術集会, 2012 年 4 月 12 日-14 日 千葉市
- ④ 川村祐輔, 伊藤翔太, 大西克彦, 3 次元重畳表示を用いた歯科手術シミュレータの検討, 情報処理学会第 74 回全国大会講演論文集, 2012 年 3 月 6 日, 名古屋市
- ⑤ 吉田能得, 山口哲, 今里聡, 村上伸也, Haptic Device を用いた適正プロービング圧トレーニングシステムの開発, 日本歯科保存学会第 135 回秋季学術大会, 2011 年 10 月 21 日, 大阪市
- ⑥ Koeda M. and Kato M., Pen tip position estimation using least square sphere fitting for customized attachments of haptic device, Proc. of the HCI International 2011, 有, July 12-14 2011, Orlando, U.S.A.
- ⑦ Onishi K., Ito S., Kawamura Y., Noborio H., Development of AR Display

System for Dental Surgical Simulator, Proc. of the HCI International 2011, 有, July 12-14 2011, Orlando, U.S.A.

- ⑧ Yamaguchi S., Yamanishi Y., Ono S., Yatani H., Imazato S., Dental Implant Surgical Navigation System by Retinal Imaging Display, Proc. of the Int.l Dental Materials Congress 2011, 有, May 27-29, Seoul, Korea.
- ⑨ 小野祐輝, 大西克彦, 表示領域を考慮した類似画像表示手法の検討, 情報処理学会第 73 回全国大会, 2011 年 3 月 4 日, 東京都
- ⑩ 伊藤翔太, 大西克彦, 歯科シミュレータにおける 3 次元モデルの重畳表示手法に関する検討, 2011 年電子情報通信学会総合大会 ISS 特別企画, 東日本大地震のためオーラル講演と質疑なしで大会の発表は成立となりました
- ⑪ 陳磊志, 鈴木遼平, 大西克彦, 視点追従によるデスクトップ領域の動的移動操作に関する検討, 2011 年電子情報通信学会総合大会 ISS 特別企画, 東日本大地震のためオーラル講演と質疑なしで大会の発表は成立となりました
- ⑫ Noborio H. and Kawamoto Y., Digital Collision Checking and Scraping Tooth by Dental Bar, Proc. of the 2010 IEEE RAS & EMBS Int. Conf. on Biomedical Robotics and Biomechanics, 有, September 26-29 2010, Tokyo, 227-234.
- ⑬ Noborio H., Yoshida Y., Sohmura T., Development of Human Interface Software in our Dental Surgical System based on Mixed Reality, Proc. of the Workshop on Computer Graphics, Computer Vision and Mathematics, 有, September 7-10, 2010, 107-114.
- ⑭ Sohmura T., Yamaguchi S., Noborio H., et al, Dental Hand Skill Simulation Training using VR Haptic Device Part-1, Performance of Originally Developed Hap-Dent System, Proc. of 36th ADEE Meeting, Amsterdam, Netherlands, 有, August 25-28, 2010, 97.
- ⑮ Yamaguchi S., Noborio H., et al, Dental Hand Skill Simulation Training using VR Haptic Device Part-4 Skill Training in Supine Position by Fusion Augmented Reality and Haptics, Proc. of 36th ADEE Meeting, 有, Amsterdam, Netherlands, August 25-28, 2010, 99.
- ⑯ Yoshida Y., Yamaguchi S., Wakabayashi K., Nagashima T., Takeshige F., Kawamoto Y., Noborio H., Sohmura T., Dental Hand Skill Simulation Training using VR Haptic Device Part-2

- Development of Probing Tasks in Periodontal Treatment -, Proc. of 36th ADEE Meeting, 有, Amsterdam, Netherlands, August 25-28, 2010, 100.
- ⑰ Yoshida Y., Yamaguchi S., Noborio H., et al, Dental Hand Skill Simulation Training using VR Haptic Device Part-3, Development of Preparation Task and Automatic Assessment Function -, Proc. of 36th ADEE Meeting, 有, Amsterdam, Netherlands, August 25-28, 2010, 101.
- ⑱ 吉田能得, 山口哲, 登尾啓史, 他, VR Haptic Device を応用した歯科ハンドスキルシミュレーショントレーニング (第7報) VR 触力覚と連動したアニメーションの導入, 第29回日本歯科医学教育学会, 2010年7月23日, 岩手医科大学
- ⑲ 吉田能得, 山口哲, 他, VR Haptic Device を応用した歯科ハンドスキルシミュレーショントレーニング-歯周治療におけるプロービングスキルトレーニング-, 第53回春季日本歯周病学会学術大会, 2010年5月14日, 盛岡市
- ⑳ 山口哲, 登尾啓史, 他, VR 触力覚を用いた歯科ハンドスキルシミュレーショントレーニング (第15報)-拡張現実感表示と触力覚呈示の融合による仰臥位でのスキルトレーニング-, 第55回日本歯科理工学会学術講演会, 2010年4月18日, 東京都
- ㉑ 吉田能得, 山口哲, 登尾啓史, 他, VR Haptic Device を応用した歯科ハンドスキルシミュレーショントレーニング (第13報)-VR 触力覚を連動したアニメーションの導入-, 第55回日本歯科理工学会学術講演会, 2010年4月18日, 東京都
- ㉒ 莊村泰治, 山口哲, 登尾啓史, 他, VR 触力覚を用いた歯科ハンドスキルシミュレーショントレーニング (第12報)-HAP-DENT による歯科ハンドスキル実習システム-, 第55回日本歯科理工学会学術講演会, 2010年4月18日, 東京都
- ㉓ 山口哲, 登尾啓史, 他, VR 触力覚を用いた歯科ハンドスキルシミュレーショントレーニング (第14報)-矯正歯科用ブラケット配置シミュレータの開発-, 第55回日本歯科理工学会学術講演会, 2010年4月17日, 東京都江戸川区

[図書] (計5件)

- ① Yamaguchi S., et al, Intuitive Surgical Navigation System for Dental Implantology by Using Retinal Imaging Display, Chapter Number 13, "Implant Dentistry - A Rapidly Evolving Practice", book edited by Ilser Turkylmaz, ISBN 978-953-307-658-4,

Published: August 29, 2011 IN-TECH Open Access Publisher, 2011, DOI: 10.5772/19034.

- ② 小枝正直, 他, 一般社団法人日本ロボット学会, オーム社, ロボットテクノロジー, 2011, 304
- ③ 小枝正直, 他, マイナビ, OpenCV 2 プログラミングブック OpenCV 2.2/2.3 対応, 2011, 296
- ④ Koeda M., et al, Virtual Reality, In Tech, Handedness and Dexterity Evaluation System Using Haptic Virtual Reality Technology, 2011, 215-234, ISBN 978-953-307-518-1
- ⑤ Yoshikawa T., Sato T. and Koeda M., ROMANSY 18 - Robot Design, Dynamics and Control, CISM International Centre for Mechanical Sciences, Vol. 524, Springer., Virtual Haptic Map Using Force Display Device for Visually Impaired, 2010, 215-234, ISBN: 978-3-7091-0276-3

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: デジタル法線の計算方法

発明者: 登尾啓史

権利者: 株式会社 Embedded Wings, 登尾 啓史

種類: 特許

出願番号: 2011-209591

公開番号: 2012-094128

出願年月日: 2011年9月26日

国内外の別: 国内

[その他]

ホームページ等

<http://www.noblab.jp/ja/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

登尾 啓史 (NOBORIO HIROSHI)

大阪電気通信大学・総合情報学部・教授

研究者番号: 10198616

(2) 研究分担者

大西 克彦 (ONISHI KATSUHIKO)

大阪電気通信大学・総合情報学部・准教授

研究者番号: 20359855

小枝 正直 (KOEDA MASANAO)

大阪電気通信大学・総合情報学部・准教授

研究者番号: 10411232

山口 哲 (YAMAGUCHI SATOSHI)

大阪大学・大学院歯学研究科・講師

研究者番号: 30397773

(2) 連携研究者

若林 一道 (WAKABAYASHI KAZUMICHI)

大阪大学・大学院歯学研究科・助教

研究者番号: 50432547