

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：32643

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25861128

研究課題名(和文) コンピュータビジョンと大規模分散処理による非侵襲レジストレーションシステムの開発

研究課題名(英文) Non-invasive imaging registration system using computer vision and distributed system

研究代表者

古徳 純一 (Kotoku, Jun'ichi)

帝京大学・医療技術学部・准教授

研究者番号：70450195

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、距離カメラなどによる非侵襲の患者体表面3次元計測の技術と、大規模分散処理によるレジストレーション計算の融合したシステムのプロトタイプの開発を目指すものである。
市販の距離画像カメラを用いて、患者体表面の動きをマーカーを用いずにリアルタイムに計測することで、商用の腹圧ベルトのセンサーと遜色ないレベルで、非侵襲でありながら体表面の多数点で同時に呼吸波形を取得できることを可能にした。また、患者体内の解剖学的変化を時系列に追跡する処理を行うため、PCクラスタを構築した。シングルプロセッサを用いた計算に比べ10倍高速化でき、精度は商用のものに比べて遜色がなかった。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to build a system for non-invasive and real-time measurement of 3D position of a patient supported by parallel and distributed computers. We constructed a non-invasive marker-less system for measuring respiratory motion at multiple points on a patient's surface using a depth camera. Obtained respiratory phase was consistent with a signal measured by a consumer monitoring system. Computation time of a PC cluster using MPI was made 10 times faster than that of a single machine. Precision of registration was almost the same as one of a standard imaging registration software.

研究分野：医学物理

キーワード：トラッキング 3次元計測 距離画像カメラ

1. 研究開始当初の背景

現代の放射線治療を支えるのは、2-3mmの精度で正確に標的部位に放射線照射を可能にしたテクノロジーの進歩にある。しかしながら、この精度は静止した標的に対する精度であることに注意が必要である。日ごとの患者の位置や呼吸による動きのブレは、ときには1cmレベルにも達し、放射線治療計画時に取得した情報をもとに計画される現在の標準的な治療では、しばしば正常な部位に放射線障害を残すことになる。この問題を克服し、現在の放射線がん治療のレベルを1段上のレベルに引き上げるためには、どうしても患者のリアルタイムの動きや、日々のセットアップの誤差を簡易に計測し、それを治療の現場にフィードバックするシステムが欠かせない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、コンピュータビジョンの手法と分散処理の手法を融合して、全く新しい形で、非侵襲的に患者の動体追跡を行い、放射線治療を高精度化するシステムの基盤技術の開発である。カメラから照射される赤外光の反射から得られる患者までの深度情報と、高度なコンピュータビジョンの基盤に基づいた動体追跡の技術を組み合わせ、患者の体輪郭の時系列の3次元情報を取得し、アダプティブセラピーのためのイメージングレジストレーションを行う。また、これら時系列の画像データ群という大規模データ処理を支えるインフラとしてのクラスタマシンの開発を行う。

3. 研究の方法

1) 非侵襲3次元リアルタイム計測システムの開発

3次元リアルタイム計測の予備実験として、患者の体表面に取り付けた多数の三角マーカーを、市販のウェブカメラの2次元画像を用いて、多数点同時追跡する。まず、マーカーの頂点をエッジ検出し、この検出した多数の頂点の時系列データをオプティカルフローによって追跡した。

患者に与える負担を極限まで低減するために、マイクロソフト社製の距離画像カメラKinectセンサーを用いて、マーカーを用いずに患者体表面の動きをリアルタイムで3次元計測する。距離カメラを用いることで、非侵襲でありながら体表面の多数点で同時に呼吸波形を取得できることを可能にした。ただし、Kinectセンサーの深度方向の分解能は数mmであり、そのままでは呼吸波形の取得には使用できない。そこで、我々は、画素値を周辺で和をと

り、時間方向に2次関数で近似する上田氏のアルゴリズムを用いることで、距離分解能を一気に10倍程度向上させることに試みた。

距離画像カメラは、患者情報に図左のように取り付けた。このカメラから得られる深度情報は、図右のように2次元の距離画像として取得できる。本研究では、この領域を図に示したように、多数の正方形領域に分割し、領域毎に求めた深度値の和の時系列データを、時間方向に補完することで、呼吸カーブを取得した。求めた領域毎の値を、薄板スプラインを用いて、平面として内挿した。



図：距離カメラを用いた実験のセットアップ

2) 多数の2次元画像による3次元再構成

患者位置の高精度な情報取得のため、複数枚の2次元画像から、エピポーラ幾何と呼ばれる数学を用いて、疎な点群を再構成し、密な再構成を続けて行うことで、患者の3次元情報の再構成を行った。高速なアルゴリズムを使用することで、患者セットアップの大幅な労力削減につながると期待できる。下に示す図は、再構成に使用した2次元画像セットの一部である。



図：多数の方向から撮影した被験者の2次元画像。

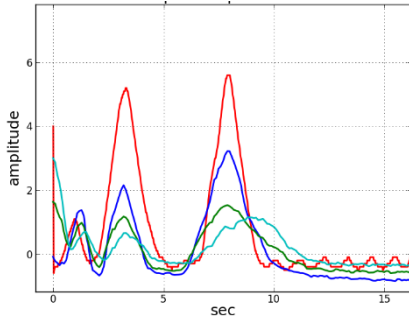
3) 大規模分散処理を用いたレジストレーションシステムの開発

逐次的な画像変形を要求されるアダプティブセラピーの基盤技術として、患者体内の解剖学的変化を時系列に追跡する処理を行うため、コンピュータ6台をギガビットイーサーでつなぎ、PCクラスタを構築し、Bスプラインを用いた非剛体レジストレーションシステムの並列化を行った。さらにPC1台でのGPU2枚を制御したデータ分割演算も行った。

4. 研究成果

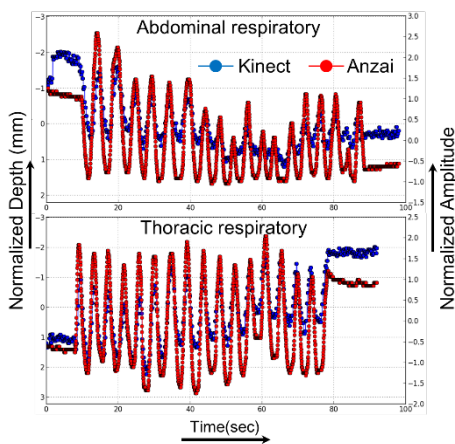
1) 非侵襲 3次元リアルタイム計測システムの開発

オプティカルフローによる患者の動体追跡の結果を下図に示す。赤色の市販の呼吸モニターに、腹部（青）、胸部（緑）の動きがよく一致していることがわかる。頸部（水色）では位相がずれているが、これは、呼吸が単純な剛体運動では無いことを示唆していると考えられる。



図：市販の呼吸モニター（赤）と、オプティカルフローによる腹部（青）、胸部（緑）、頸部（水色）の追跡カーブ。

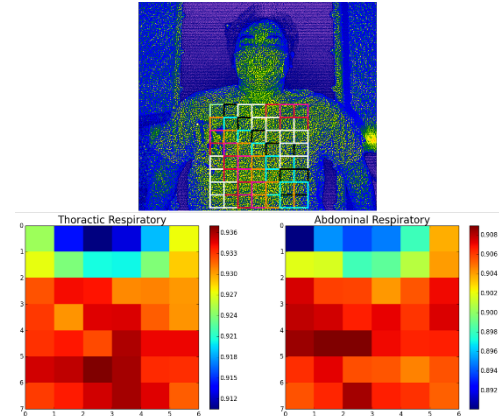
市販の呼吸モニタリングシステム（赤）と、距離画像カメラを使用した我々のシステム（青）の同時取得呼吸波形を下図に示す。市販のモニタリングシステムは、腹圧を出力し、我々のシステムは変位を測定しているため、縦軸の直接の比較はできないが、両方で位相がぴったりあっていることが見て取れる。従来は、数 mm といわれていた Kinect の距離分解能を、上田氏によるアルゴリズムを用いることで、一気に 10 倍程度向上させることに成功した。



図：商用呼吸モニターと我々のモニターの呼吸カーブの比較

さらに、これらの波形を、体内の様々な箇所において測定し、腹部につけた市販の呼吸モ

ニターとの相関係数の分布を描いたのが、下の図である。ほとんどの領域において、0.9 以上の高い相関係数を示している。頸部付近が腹部と位相がずれていることがわかるが、これはオプティカルフローのときと同じ現象が見えていると考えられる。

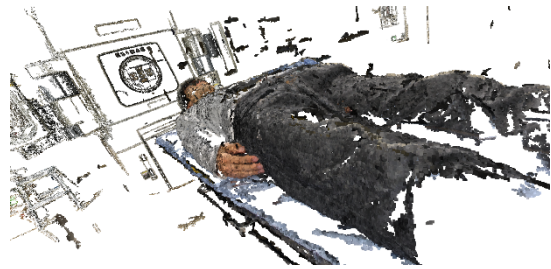


図：体表面の腹部との呼吸の相関係数

これらの研究成果を、アメリカ医学物理学会での発表、プロシーディング、国内シンポジウムの発表、医学物理学会の口頭発表として発表した。また、第 106 回医学物理学会の優秀研究賞を受賞した。

2) 多数の 2次元画像による 3次元再構成

下に示す図は、再構成された被験者のスナップショットである。実際にデータは 3次元で較正されている。再構成後の 3次元データの、射影平面への再投影誤差は、1 mm 以内であった。



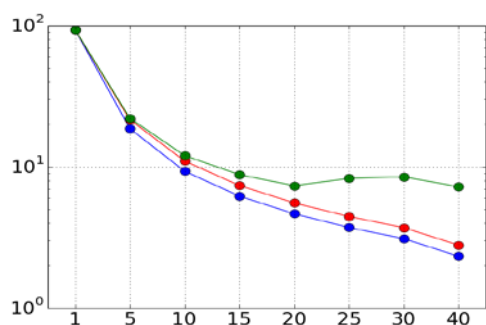
図：被験者の 3次元再構成の例

これらの研究成果を、アメリカ医学物理学会で、プロシーディング、国内シンポジウムでの発表、日本医学物理学会での口頭発表として発表した。

3) 大規模分散処理を用いたレジストレーションシステムの開発

PC クラスタによる B スプラインを用いた非剛体レジストレーションシステムの並列化の結果を、下図に示す。シングルプロセッサを用いた計算に比べ 10 倍高速化でき、精度は商用のものとは遜色がなかった。さらに PC1

台での GPU2 枚を制御したデータ分割演算により、並列化効率 100%に近い演算を達成することに成功した。



図：プロセッサ数に対する計算時間。測定値（緑）と並列化 83%としたときのグスタフソンの法則からの予測（赤）と、MPI 理想値（青）。

これらの研究成果を、アメリカ医学物理学会の発表、プロシーディング、医学物理学会の口頭発表として発表した。

研究期間全体で、学会発表（12 件）うち招待講演（3 件）、国際学会発表（4 件）、論文（12 編）として発表した。また、第 106 回医学物理学会優秀研究賞を受賞した。

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 12 件）

1. Kanda T, Fukusato T, Matsuda M, Toyoda K, Oba H, Kotoku J, Haruyama T, Kitajima K, Furui S, Gadolinium-based Contrast Agent Accumulates in the Brain Even in Subjects without Severe Renal Dysfunction: Evaluation of Autopsy Brain Specimens with Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy., *Radiology* 142690 2015 年 5 月 , DOI:10.1148/radiol.2015142690, 査読有り
2. Kanda T, Kiritoshi T, Osawa M, Toyoda K, Oba H, Kotoku J, Kitajima K, Furui S, The incidence of double hypoglossal canal in Japanese: evaluation with multislice computed tomography, *PloS one* 10 e0118317 2015 年 , DOI:10.1371/journal.pone.0118317, 査読有り
3. Kanda T, Osawa M, Oba H, Toyoda K, Kotoku J, Haruyama T, Takeshita K, Furui S, High Signal Intensity in Dentate Nucleus on Unenhanced T1-weighted MR Images: Association with Linear versus Macrocyclic Gadolinium Chelate Administration, *Radiology*

140364 2015 年 1 月 , DOI:10.1148/radiol.2015142690, 査読有り

4. J Kotoku, S Nakabayashi, A Haga, S Kumagai, T Ishibashi, N Arai, N Saotome, T Kobayashi, 3D Surface Reconstruction of a Patient Using Epipolar Geometry, *Medical Physics* 06/2014;41(6):185-185. DOI:10.1118/1.4888180, 査読有り
5. 熊谷仁, ISHIBASHI Toru, UEMURA Ryohei, ARAI Norikazu, KOBAYASHI Takenori, Kotoku Jun'ichi, 距離カメラを用いた 3 次元リアルタイムトラッキングシステムの開発, *医学物理 Supplement* 34(1) 145 2014 年 4 月, 査読有り
6. 古徳純一, NAKABAYASHI Susumu, ARAI Norikazu, KUMAGAI Shinobu, ISHIBASHI Toru, KOBAYASHI Takenori, 多視点幾何を用いた患者位置の 3 次元再構成, *医学物理 Supplement* 34(1) 146 2014 年 4 月, 査読有り
7. 石橋徹, KUMAGAI Shinobu, ARAI Norikazu, KOBAYASHI Takenori, Kotoku Jun'ichi, 分散処理を用いたレジストレーションシステムの高速度化, *医学物理 Supplement* 34(1) 205 2014 年 4 月, 査読有り
8. HAGA Akihiro, Kotoku Jun'ichi, HORIKAWA Yataro, SAKATA Dousatsu, MAGOME Taiki, NAKAGAWA Keiichi, Photoelectric cross sections based on the Hartree-Fock calculation, *医学物理 Supplement* 34(1) 162 2014 年 4 月, 査読有り
9. 古徳純一, 古井滋, 目で見てわかる!心臓カテーテル検査・治療のケア レベルアップキーワード 25 6 被ばく管理, *Heart Nurs* 27(8) 824-827 2014 年 8 月, 査読無し
10. Kotoku Jun'ichi, Kumai Sae, Kumagai Shinobu, Arai Norikazu, Kobayashi Takenori, Acquiring respiratory signal by use of optical flow for tracking, *医学物理 Supplement* 33(3) 69 Sep 2013, 査読有り
11. Kumagai Shinobu, Saotome Naoya, Futaguchi Masahiko, Arai Norikazu, Takimoto Kenji, Kobayashi Takenori, Kotoku Jun'ichi, Comparison of the image registration between in-house program and commercial software, *医学物理 Supplement* 33(3) 71 Sep 2013, 査読有り
12. J Kotoku, A Haga, S Kumagai, N Saotome, T Kobayashi, Energy Spectrum Inference of Clinical Photon Beam by Use of PDD, *Medical Physics* 06/2013; 40(6):396.

[学会発表] (計 12 件)

1. 古徳純一、医学物理分野での研究課題と物理出身者の役割、シンポジウム「医学物理士の現状と課題」、2014 年 11 月 2 日、京都大学基礎物理学研究所 湯川記念館 (京都府京都市)
2. Jun'ichi Kotoku, Non-invasive techniques for 3D surface tracking, University of Minnesota, The University of Tokyo, Osaka University Scientific Symposium, 2014 年 7 月 25 日、ミネソタ大学、ミネソタ (米国)
3. J Kotoku, S Nakabayashi, A Haga, S Kumagai, T Ishibashi, N Arai, N Saotome, T Kobayashi, 3D Surface Reconstruction of a Patient Using Epipolar Geometry, AAPM 56th Annual Meeting, 2014 年 7 月 20 日—2014 年 7 月 24 日, Austin Convention Center, Austin (USA)
4. Ishibashi Toru, KUMAGAI Shinobu, ARAI Norikazu, KOBAYASHI Takenori, KOTOKU Jun'ichi, Fast image registration on parallel and distributed computers, 第 107 回日本医学物理学会学術大会, 2014 年 4 月 13 日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
5. Jun'ichi Kotoku, NAKABAYASHI Susumu, ARAI Norikazu, KUMAGAI Shinobu, ISHIBASHI Toru, KOBAYASHI Takenori, 3D reconstruction of a patient's body using epipolar geometry, 第 107 回日本医学物理学会学術大会, 2014 年 4 月 12 日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
6. Shinobu Kumagai, ISHIBASHI Toru, UEMURA Ryohei, ARAI Norikazu, KOBAYASHI Takenori, KOTOKU Jun'ichi, Realtime 3D tracking with a consumer depth camera, 第 107 回日本医学物理学会学術大会, 2014 年 4 月 12 日、パシフィコ横浜 (神奈川県横浜市)
7. 古徳純一、医学物理に必要な基礎数学—高次元関数を“見る”方法—、医学物理インテンシブコース、2014 年 2 月 8 日、順天堂大学 (東京都文京区)
8. 古徳純一、コンピュータビジョンで切り拓く放射線治療、平成 25 年度第 7 回重粒子線医工連携セミナー、2013 年 11 月 1 日、群馬大学重粒子線医学センター (群馬県前橋市)
9. A. Haga, S. Saegusa, J. Kotoku, H. Yamashita, A. Sakumi, K. Nakagawa, What Respiratory-Phase CT Is Optimal in Treatment Planning of Lung Cancer?, 56th annual meeting of American Society of Radiation Oncology, 2013 年

9 月 22 日—2013 年 9 月 25 日、Atlanta at the Georgia World Congress Center, Atlanta (USA)

10. KOTOKU Jun'ichi, KUMAI Sae, KUMAGAI Shinobu, ARAI Norikazu, KOBAYASHI Takenori, オプティカルフローを用いた呼吸性移動の動体追跡, 第 106 回日本医学物理学会学術大会, 2013 年 9 月 18 日, 大阪大学 (大阪府吹田市)
11. Kumagai Shinobu, SAOTOME Naoya, FUTAGUCHI Masahiko, ARAI Noikazu, TAKIMOTO Kenji, KOBAYASHI Takenori, KOTOKU Junichi, 開発したレジストレーション処理プログラムと治療計画支援ソフトウェアの精度比較, 第 106 回日本医学物理学会学術大会, 2013 年 9 月 18 日, 大阪大学 (大阪府吹田市)
12. A Haga, J Kotoku, S Kida1, Y Masutani, H Yamashita, W Takahashi, T Imae, K Nakagawa, Registration Accuracy with Four-Dimensional Cone-Beam CT for Lung Cancer Treatment, 55th annual meeting of American Association of Physicists in Medicine, 2013 年 8 月 4 日—2013 年 8 月 7 日、Indiana Convention Center, Indianapolis (USA)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :
発明者 :
権利者 :
種類 :
番号 :
出願年月日 :
取得年月日 :
国内外の別 :

[その他]

第 106 回日本医学物理学会学術大会優秀研究賞受賞
ホームページ等
<https://www.e-campus.gr.jp/staffinfo/public/staff/detail/1339/35>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古徳 純一 (KOTOKU JUNICHI)
帝京大学・医療技術学部・准教授
研究者番号：70450195

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：