

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700180

研究課題名(和文) 球面調和関数を用いた肝臓統計形状モデル構築と肝硬変診断支援への応用

研究課題名(英文) Efficient Shape Representation and Statistical Shape Modeling of the Liver Using Spherical Harmonic Functions (SPHARM)

研究代表者

健山 智子 (Tateyama, Tomoko)

立命館大学・情報理工学部・助教

研究者番号：90550153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円、(間接経費) 1,020,000円

研究成果の概要(和文)：高精細医用画像から構築された人体臓器統計形状モデルは各臓器の個体差バリエーションを記述したモデルであり、診断や治療支援への応用が期待できる。各臓器の3次元形状表現の有効な手法として球面調和関数を用いた臓器形状ベクトル表現が挙げられるが、臓器間における球面調和関数の次元数は異なるため、各臓器間の統計形状モデル構築に対する次元数特定やその差異に対する統計形状モデル性能評価が確立されていない。故に球面調和関数による臓器統計形状モデルの支援診断への応用は未着手である。本研究では、球面調和関数を用いた信頼性の高い統計形状モデル構築、性能評価を行った。

研究成果の概要(英文)：In medical image analysis, the three-dimensional (3-D) shape representation and modeling of anatomic structures using only a few parameters is an important issue, and can be applied to computer assisted diagnosis, surgical simulations, visualization, and many other medical applications. In this paper, we propose an efficient shape representation method using spherical harmonic functions (SPHARM) for 3D anatomical structure such as the liver. We show that the 3D shape of the liver can be reconstructed by a few coefficients of the SPHARM. We also propose to use SPHARM based shape representation for statistical shape modeling. Since the dimension of SPHARM based shape representation vector is much lower than the conventional shape representation using coordinates of surface points, our proposed method can be used for small number of training samples and enhance the computation cost.

研究分野：情報学

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：臓器形状モデリング 球面調和関数 形態変化 支援診断 肝硬変症

1. 研究開始当初の背景

CTやMRI等の高精細医用画像と計算機の目覚ましい発展に伴い、人体内部の3次元解剖構造理解を目指した研究が国内外において活発に行われている。米国では1986年より“Visible Human”という、高精細医用画像からの人体三次元内部構造の可視化を行うプロジェクトがスタートしている。日本国内では平成14-18年度まで特定領域研究「多次元医用画像の知的診断支援」において電子アトラス(データベース)整備が行われており、更に平成20年度より新学術領域「計算解剖学」がスタートし、個体差のある解剖構造を統計数理的モデル(統計形状モデル)に基づいて表現する計算解剖モデル構築およびその応用研究が活発に行われている。

統計形状モデルは計算解剖学や医用画像処理において、臓器位置特定や領域抽出など解剖や医学教育へ幅広い応用が期待されているが、診断や治療支援等の臨床応用展開へは未だ検討することが多い。その理由として、統計形状モデル構築を行う際に以下の問題が指摘される。

- (1) 臓器には顕著なランドマークが存在しないため、従来法の症例間対応付けは推定問題を解いている。その計算は膨大かつ複雑であるだけでなく精度が低いため、表現される形状モデル精度も低い。
- (2) 従来の統計形状モデルは対象臓器表面上に複数(数百~数千) $n$ 点の直交座標で形状ベクトルを構成しているため、その次元数は $nx3$ となってしまう、学習症例数に対し膨大な次元となる。よって、汎化能力が非常に低い統計形状モデルとなり、様々な形態バリエーション表現が困難。

先行研究では球面調和関数を用いて表現した脾臓の形状ベクトル次元数は従来の形状ベクトル次元数を96%削減しても元の形状を97%以上の精度で再構成し、わずか9症例の学習データでも汎化能力の高い統計形状モデル構築が可能であることを示した[2](図1)。脾臓など円形に近い臓器は、その臓器の重心と任意方向の表面点間の距離を用いて球面調和関数展開が可能であるが、肝臓のような臓器では形状や重心位置によっては表面点との交点が複数となり、正確な形状表現とならないため、より正確なモデル構築のためにも検討すべき問題である。

2. 研究の目的

本研究期間内に以下の課題に焦点を絞り研究を行った。

- (1) Parameterizationによる肝臓形状表現とロバストな症例間特徴対応付けの確立

臓器表面を単位球へ写像して形状表現を行うParameterizationにより、任意方向の複数特徴点取得の問題解決ができる。また、Parameterizationによる形状表現は球座標で表

現されているので、球面調和関数へ展開が可能である。球面調和関数は3次元形状の基底関数のようなものであり、基底関数項が高いほど高周波を表し、複雑な形状特徴を表現する。これらの特徴を利用し、低次の基底関数項を症例間で合わせることで対応付けだけでなく、位置合わせも容易になる。症例間対応付けを解析として行うので、高精度かつ容易な計算を実現する。

- (2) 球面調和関数を用いた少数症例に対しても汎化能力の高い統計形状モデル構築と評価

任意の形状は球面調和関数上に射影して得られた係数と基底関数(球面調和関数)の線形和によって元の形状再現が可能である。我々は球面調和関数の特性を用いて、臓器の形状特徴ベクトル次元数を従来の形状ベクトル次元数の96%以上抑えても97%以上の精度で元の形状を再現した。従って、球面調和関数を用いた臓器形状表現は効率的に形状ベクトル次元数の抑制が可能であり、少数症例からでも汎化能力の高い統計形状モデルが構築できる。さらには球面調和関数の次元と疾患情報の相関を解析することで疾患形態解析応用が期待できる。

- (3) 統計形状モデルと臨床検査データの相関関係を用いた肝硬変数値解析

汎化能力の高い統計形状モデルと血液や尿などの臨床検査間の対応付けが可能となれば、疾患情報の数値評価が可能となる。この数値評価は客観的な診断支援や経年変化観測だけでなく、肝硬変の特徴や性質へのアプローチ、他疾患との関係性解明に繋がる。

3. 研究の方法

- (1) 肝臓の統計形状モデル構築と肝硬変症支援診断

提案法を検証するため、本研究でははじめに従来法における臓器の統計形状モデル構築と肝硬変症の支援診断を構築する。従来の臓器三次元形状モデルは一般的に、Marching Cubes法を用いて行う。患者個人のCT画像から手で肝臓情報を抽出し、輝度値情報を元に肝臓の表面上で1,000点の特徴点情報を算出し、メッシュ情報を構成する。このメッシュ情報に基づいて臓器の3次元形状情報を表現する。上記の手法によって得られる臓器 $v$ の3次元形状ベクトルの表現は下式となる。

$$v = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_{1000}, y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_{1000}, z_1, z_2, \dots, z_i, \dots, z_{1000})^T \quad (1)$$

ここで、 $(x_i, y_i, z_i)^T$ は臓器における $i$ 番目の表面座標を示す。したがって、得られる三次元臓器形状表現は図1のように表現される。肝硬変は右葉部萎縮、左葉部腫大化の特徴ならびに表面の凸凹化という形態変化が主な特徴として診断される。ゆえに観測された症

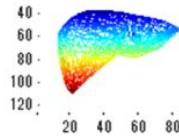


図 1 : 肝臓の三次元形状情報表現(直交座標)症例に対して,主成分分析法(以後 PCA,式(2))にもとづいて図 1 に示す臓器形状より,臓器の形態変化を解析する.

$$\mathbf{v}_j = \mathbf{m} + \sum_{i=1}^N b_i \mathbf{u}_i \quad (2)$$

ここで,  $j$  はサンプル番号,  $\mathbf{m}$  は全サンプルの平均ベクトル,  $\mathbf{u}_i$  と  $b_i$  はそれぞれ固有成分(固有ベクトル, 固有形状)と各固有成分の係数である.

この PCA から得られた固有値係数(成分)を用いて,肝硬変症の特徴を選択するため,本研究では正常症例と疾患症例の各モデル係数の平均値と分散を考慮し,重複の少ない成分を肝硬変症の支援診断有効成分として選択する.

## (2) 球面調和関数による臓器の三次元形状モデル表現の比較

球面調和関数は 3 次元ラプラス方程式の解を,球座標を用いて角度方向に展開した 3 次元形状の基底関数である.任意の形状は球面調和関数上に射影して得られた係数と基底関数との線形和によって表現される.従って,線形和の項が増えるほど元の形状に近似し,得られた各項の係数を形状ベクトルとして定義できる.この形状ベクトルの次元数を抑制することで効率的な形状情報表現となり,高度な形状解析が期待できる.球面調和関数に基づく形状表現は形状を直交座標系から球座標系を用いて表現を行う.そのため,直交座標から球座標への高精度な変換が求められる.本研究では,2009 年に Li Shen らによって提案された CALDmodel に基づく Parameterization 法[2]を用いて,臓器情報を単位球に射影し,射影空間上で球面調和関数の展開を行う.球面調和関数展開の概要図を図 2 に示す.ここで,  $Y^m_l(q, f)$  は球面調和関数であり,臓器表現の基底関数となる.また,パラメータ  $l, m$  は整数であり,この  $l$  はモデルの次数 (degree),  $m$  は位数 (order) である.したがって,各臓器,サンプルはこの球面調和関数へ射影して得られる係数によって臓器形状表現を行うことができ,  $l$  を増やすことで,臓器形状表現近似ができる.この臓器形状ベクトル  $\mathbf{c}_i^m$  を下式で示す.

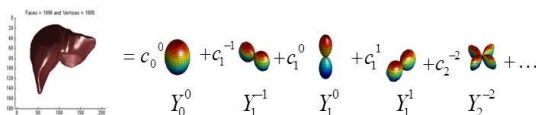


図 2 : 球面調和関数による肝臓形状表現概要

$$\mathbf{c}_i^m = [c_{0x}^0, c_{0y}^0, c_{0z}^0, c_x^1, \dots, c_{xn}^{-n}, c_{yn}^{-n+1}, \dots, \dots, c_{xL_{\max}}^0, \dots, c_{yL_{\max}}^{L_{\max}-1}, c_{L_{\max}}^{L_{\max}}]^t \quad (3)$$

式(3)より,従来の直交座標表現と比較すると少ないベクトル次元数で形状表現が可能となり,効率的な形状表現であるといえる.本研究では,この球面調和関数を肝臓,脾臓の臓器に対して展開し,効率的な臓器形状表現を行った.

## (3) 球面調和関数を用いた肝臓の臓器統計形状モデルの構築

球面調和関数を用いた臓器形状表現に対し,(1)の手法と同様,PCA を用いて臓器の統計形状解析を行った.その性能評価を汎化能力,表現効率化,特異排他能力を用いて検証した.

[1] 上谷, 健山, 陳, 他(8名)肝臓の統計形状モデル構築と肝硬変症支援診断システムへの応用,電気学会論文誌 C 部門誌, vol.133, no.11, 2037-2043.2013

[2] Shen L, Farid H et al, :Modeling three-dimensional morphological structures using spherical harmonics. International Journal of Organic Evolution 63, 1003-1016 (2009).

## 4. 研究成果

### (1) 肝臓の統計形状モデル構築と肝硬変症支援診断

式(1)に基づいて肝臓統計形状モデルを構築し,支援診断を行った.モデル構築に用いた症例数は正常 25 症例,疾患 25 症例の合計 50 症例で構築した.また,肝硬変症の特徴を顕著に示す有効成分特定に正常と疾患症例の分散が最も大きい成分を特定した結果が図 3 である.本研究では,モデル係数において正常症例と異常症例で平均の差が大きく,分散の重なりが少ない成分の上位 2 成分を有効成分と仮定し,第 9, 4 成分を有効成分であると特定した.実際に第 9, 4 成分をそれぞれ,縦軸と横軸に設定し,中央に平均形態をプロットした統計形状モデルが図 4 である.図 4 において,各成分共に右葉の萎縮と左葉の腫大と,肝硬変症の特徴を顕著に示していることが確認でき,本研究で提案する有効成分特定が肝硬変症支援診断において十分な成果であることが示された.

### (2) 球面調和関数を用いた臓器三次元形状表現

3.(2)で記述した手法に基づいて,脾臓と肝臓の臓器三次元形状表現を行った.  $l=0 \sim 15$  による,球面調和関数に基づく臓器表現能力を図 5 に示す.  $l=0$  では球に近い形状だが,  $l$  の次元を更新する毎に,肝臓・脾臓共に元の形状と近似している.この  $l=15$  における臓器の係数は  $3 \times (15+1)^2=256$  となり,従来の臓器三次元モデルと比較すると,25.6%の次元数で統計形状モデルの構築が可能となり,両臓器ともに十分なパラメータ数の削減が可能である.

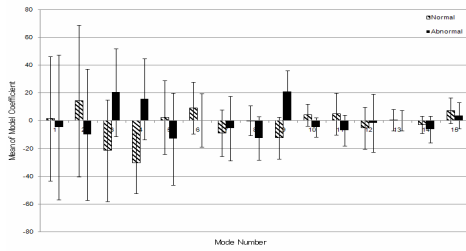


図3：肝硬変症の特徴成分特定成分別モデル係数の平均と分散

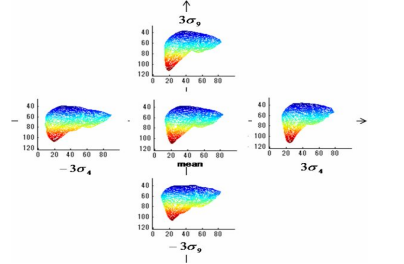
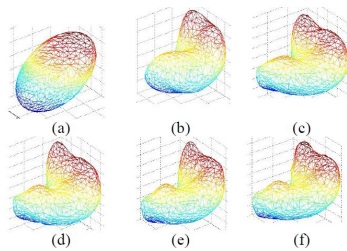


図4：肝硬変症の統計形状モデル  
(縦軸：第9成分，横軸：第4成分)

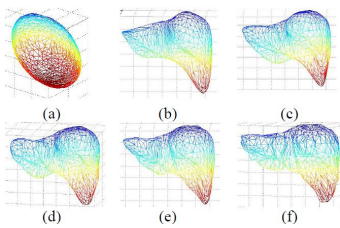
(3) 球面調和関数による臓器3次元形状を用いた臓器の統計形状モデル

(2)で得られた，球面調和関数による臓器の3次元形状ベクトルを用いて，従来法と同様，PCAを用いて臓器の統計形状モデルを構築した．構築されたモデルの性能評価を(a)表現能力，(b)汎化能力，(c)特異排他能力によって行った

(a)の表現能力とは，少ないパラメータ数で形状をどのくらい再構成できるかを評価するための指標である．点分布ベースの統計形状モデルでは，頂点座標を形状表現に直接用いていたことから，ベクトルの次元数は1,000×3=3,000となる．一方，球面調和関数に基づく統計形状モデルでは，次元数 $l=15$ において $3 \times (15+1)^2=256$ となり，点分布モデルと比較すると，25.6%の次元数で統計形状



脾臓の三次元形状表現



肝臓の三次元形状表現

図5：球面調和関数による臓器の形状表現，上下(a)  $l=1$ ，(b)  $l=5$ ，(c)  $l=10$ ，(d)  $l=12$ ，(e)  $l=15$ ，(f)元形状

モデルの構築が可能となり，十分なパラメータ数の削減が可能であった．

(b)の汎化能力は，構築されたモデルが，学習用データ以外のデータに対してもロバストに形状を再現できるかを確認した図6からも確認できるように，従来法と比較すると，十分な形状再表現が行われていない．これは，球面調和関数によって，次元数を抑制されているものの，係数ベクトルの減少により，形状再構成に大きく影響が出たことが推測されるため，今後さらに症例数を増やすことが本研究の今後の課題であることを示した．

(c)の特異排他能力は，モデルによって再構成される形状の妥当性であり，疾患でないデータを疾患とする特異情報に対し，排他を行う能力である．特異排他能力の結果について，図7に示す．従来法と比較すると50%以上で特異形状に対する排他能力が期待できることを示した．本研究により，球面調和関数による臓器3次元形状表現により，効率的な統計形状モデルが構築できることを示した．

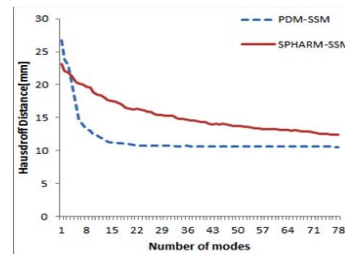


図6：汎化能力の比較

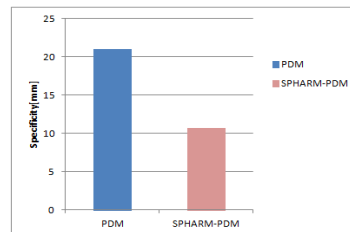


図7：特異排他能力比較

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文](計7件)

1. 上谷芽衣，健山智子，陳延偉，他(8名) 肝臓の統計形状モデル構築と肝硬変症支援診断システムへの応用，電気学会論文誌C(電子・情報・システム部門誌)，vol.133,no.11,2037-2043，<http://dx.doi.org/10.1541/ieejieiss.133.2037>，2013(査読有)
2. 健山智子，陳延偉，他(12名)患者に特化した肝臓情報とその脈管分布可視化及び対話かつ直感的な手術支援システムの構築，Medical Imaging Technology，vol.31,no.3,pp.176-188,2013.  
<http://dx.doi.org/2013,10.11409/mit.31.176>(査読有)

3. Yen-Wei Chen, Jie Luo, **Tomoko Tateyama**, et al (6 authors), :Computer-Aided Diagnosis and Quantification of Cirrhotic Livers Based on Morphological Analysis and Machine Learning. Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2013, Article ID 264809, 8pages, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/264809>, 2013. (査読有)
  4. Yen-Wei Chen, **Tomoko Tateyama**, Akira Furukawa, et al (7 Authors) , Application of Statistical Shape Model of the Liver in Classification of Cirrhosis, International Journal of Digital Content Technology and its Applications, Vol. 7, No. 9, pp.477-484, 2013. (査読有)
  5. Masaki Kaibori, Yen-Wei CHEN, **Tomoko Tateyama**, et al (12 authors), Novel Liver Visualization and Surgical Simulation System, Journal of Gastrointestinal Surgery, Vol.17, pp.1422-1428, 2013, <http://dx.doi.org/10.1007/s11605-013-2262-x>. (査読有)
  6. 北林大介, **健山智子**, 陳延偉, 他(8名), 遺伝子関連研究に向けた3次元顔形状解析のフレームワーク, 日本顔学会誌, 第13号, pp.63-74, 2013. (査読有)
  7. M.SEO, G.DUAN, **T. TATEYAMA**, Y-W.CHEN, Individual-Adapted Facial Shape Transformation based on Subspace Learning, International Journal of Intelligent Information Processing(IJIIP) Volume3. Number2 pp.47-55. June 2012. <http://dx.doi.org/10.4156/IJIIP.vol3.issue2.7> (査読有)
- [学会発表](計 26件)
1. **健山智子**, 陳延偉, 他(9名): Kinect Depth センサーを用いたハンズフリー操作による手術支援のための医用画像対話可視化システム, JAMIT2014, 東京慈恵会医科大学 (2014年7月発表予定), 東京都.
  2. J Wang, , **T Tateyama**, Y-W Chen, (5 authors), Multi-Touch Based Medical Image Analysis and Visualization System, COMPUTER CARS2014, FUKUOKA CONVENTION CENTER, 2014.6.28, Fukuoka, Japan.
  3. R Xu, S Tanaka, **T Tateyama**, et al (7 authors): Fast transparent and fused visualization of pulmonary structures represented by large-scale complex polygon meshes, CARS2014, FUKUOKA CONVENTION CENTER, 2014.6.27, Fukuoka, Japan.
  4. C Dong, , **T Tateyama**, Y-W Chen et al(5 authors): Multi Organ Bounding Box Annotation based on Adaptive Selection of Skeleton References, 医用画像工学研究会, 2014.6.24, 九州大学, 福岡.
  5. S Zhu, Z Deng, **T Tateyama**, Y-W Chen, et al(6 authors), Preliminary Study on Interactive and Collaborative 3D Virtual Medical Image Visualization System, 医用画像工学研究会, 2014.6.24, 九州大学, 福岡, 2014
  6. J-Wang, **T Tateyama**, Yen-Wei Chen et al. (5 authors): Multi-touch Based Medical Interactive Visualization System, MI 研究会, 2014.5.22, 名古屋工業大学, 愛知.
  7. A Taniguchi, **T Tateyama**, Y-W Chen et al (6 authors), Automated Assessment of Small Bowel Motility Function Based on Three-dimensional Zero-mean Normalized Cross Correlation, BMEI 2013, 2013.12.18. Hangzhou, China.
  8. Jian W, **Tateyama. T**, Chen YW et al (5 authors), A Preliminary Study on Multi-Touch Based Medical Image Analysis and Visualization System, BMEI 2013, 2013.12.18. Hangzhou, China.
  9. 中津美冴, **健山智子**, 陳延偉, (6名) 遺伝子関連研究のための顔面形態解析第2報 非剛体位置合わせ不要な対応付け法, 平成23年度電気関係学会関西支部連合大会, 2013.11.16, 大阪電気通信大学, 大阪府.
  10. J.Luo, Y-W Chen, **T Tateyama**, (7 authors), Pilot Study of Applying Shape Analysis to Liver Cirrhosis Diagnosis, ICIP2013, 2013.9.17, Melbourne, Australia.
  11. Y.Fujimoto, **T Tateyama**, S Tanaka (7

- authors), Local Transparency Control of Medical Slice Images and its Application to Slice-Slice and Slice-Volume Fusion, JSST2013, 2013 9. 12, Meiji University, Tokyo Japan.
12. **健山智子**, 陳延偉, 他(10 名): 球面調和関数による人体臓器の統計形状モデルの構築と性能評価, JAMIT2013, 2013 8.3. 日本科学未来館, 東京都 (JAMIT2013 奨励賞受賞).
  13. 上谷芽衣, **健山智子**, 陳延偉, (7 名), 統計形状モデルの構築と肝硬変症支援診断への応用, JAMIT2013, 2013.8.1, 日本科学未来館, 東京都.
  14. Y-W Chen, **Tomoko Tateyama**, (10 authors), Computer-Aided Liver Surgical Planning System Using CT Volumes, EMBC2013, 2013.7.4, Osaka International Convention Center, Osaka Japan.
  15. 谷口絢子, **健山智子**, 陳延偉, (7 名): フレーム間差分法による小腸収縮運動の自動解析, 医用画像工学研究会, 2013 5 24, 愛知工業大学, 愛知県.
  16. 進藤典, **健山智子**, 陳延偉, (11 名) "患者個人に特化した手術シミュレーションのための肝臓血管構造の抽出," 医用画像(MD)研究会, 2013.1.24, 那覇てんぷす館, 沖縄県.
  17. C-L Lin, **T.Tateyama**, Y-W.Chen, (5 名) "3D Non-rigid Medical Volume Registration using Landmark Based Initialization for Locoregional Therapy of Liver," 医用画像(MD)研究会, 2013.1.24, 那覇てんぷす館, 沖縄県.
  18. 谷口絢子, 古川顕, **健山智子**, 陳延偉, "時間変化を考慮に入れた3次元正規化相関による小腸 MRI 画像の自動解析," 平成 24 年度電気関係学会関西支部連合大会, 2012.12.8, 関西大学, 大阪府.
  19. 田中英俊, 陳延偉, 椎野顕彦, **健山智子** "頭部 MR 画像を用いた萎縮度評価による支援診断システムの開発," 平成 24 年度電気関係学会関西支部連合大会, 2012.12.8, 関西大学, 大阪府.
  20. 上谷芽衣, **健山智子**, 小原伸哉, 田中英俊, 韓先花, 金崎周造, 古川顕, 陳延偉, "腹部複数臓器の電子アトラス構築" 平成 24 年度電気関係学会関西支部連合大会, 2012.12.8, 関西大学, 大阪府.
  21. 進藤典, **健山智子**, 陳延偉, 他(11 authors) "患者個人に特化した手術治療支援のための血管構造の抽出" 平成 24 年度電気関係学会関西支部連合大会, 2012.12.8, 関西大学, 大阪府.
  22. **T.Tateyama**, M.Uetani, Y-W Chen, et al (12 authors) "Efficient Shape Representation and Statistical Shape Modeling of the Liver Using Spherical Harmonic Functions (SPHARM)," SCIS2012, Kobe International Exhibition Center, 2012.11.20, Hyogo, Japan.
  23. C.Fujiwara, **T.Tateyama**, Y-W Chen et al.,(6 authors): "Behavior Generation of Fish School by the Potential Field Method in Virtual Aqua Museum," ISSDM2012, 2012.10.23, Taipei, Taiwan,.
  24. Y-W Chen, **T.Tateyama**, et al (7 authors): "Statistical Shape Model of the Liver and Effective Mode Selection for Classification of Liver Cirrhosis," ISSDM2012, 2012.10.23, Taipei, Taiwan.
  25. J.Luo, **T.Tateyama**, Y-W Chen, et al (7 authors): "A Novel Components Selection Method in Statistical Shape Model for Computer-aided Diagnosis -- And its Application for Assisting Cirrhosis Diagnosis --," MI 研究会, 2012.5.17, 名古屋工業大学, 愛知県.
  26. **健山智子**, 陳延偉, 他(7 authors), "SPHARM ベース統計形状モデルと点分布ベース統計形状モデルとの性能比較," MI 画像研究会, 2012.5.17, 名古屋工業大学, 愛知県.
- {その他}
- <http://www.ritsumeai.ac.jp/~tomoko/>  
<http://www.iipl.is.ritsumeai.ac.jp/>
6. 研究組織  
 (1) 研究代表者  
 健山 智子 (TATEYAMA TOMOKO)  
 立命館大学・情報理工学部・助教  
 研究者番号: 90550153