

動態解析による生理機能の視覚化・定量化 ～単純 X 線撮影の Next Stage～

コニカミノルタ(株) ヘルスケア事業本部 臨床開発部

松谷 哲嗣



【はじめに】

InstagramやTwitterを始めとしたSNS、商品や企業のPR等、情報発信やコミュニケーションの手段は、動画コンテンツへと確実にシフトしている。様々な業界が動画に注目する理由は、圧倒的な情報量の差にある(図1)。情報が限定される静止画に対し、動画は効率よく多くの情報を伝えることができる。当社は、臨床分野において動画の価値活用を考えた。診療上の基本的な検査として広く利用されている単純 X 線撮影に着目し、診療の初期段階で得られる情報量を大幅に増加することを目指した。人体の生理的な状態を正確に理解するには、生体情報を十分に反映した動画を用いることが必然的と考えられる。現在当社は、動画による単純 X 線撮影技術を開発し、新たな画像診断の実現に取り組んでいる。

当社が開発した X 線動画解析ワークステーション KINOSIS は、X 線動画に含まれる肺野内組織の動き情報の解析(動態解析)により、呼吸器および循環器に関連した生体生理機能を視覚化・定量化することができる。本稿では、X 線動画撮影の特長および動態解析を実現する画像処理技術を紹介する。



図1 静止画と動画の情報量の差

“夜空の写真に動的情報が加われば、天体の日周運動を観察できる。”

【X 線動画撮影の特長】

X 線動画撮影装置の構成は、基本的に一般的な単純 X 線撮影装置と同様である。大きく異なるのは、胸部単純撮影において呼吸をしながら数秒間の撮影を行う点である。連続した複数枚の X 線画像を撮影することで、アニメーションと同じ原理で動画データが生成される(図2)。

撮影時間の延長は被ばく線量が増加する懸念があるが、当社は断続的理想的なパルス状 X 線照射を採用し、照射時間の短縮による被ばく線量の低減を実現した。本方式に最適化された動画対応 X 線フラットパネルディテクタ AeroDR fine¹⁾を開発し、15秒間(15frame/sec)の撮影で約 1.5mGy、IAEA ガイダンスレベル²⁾の 1.9mGy 以下(胸部 X 線単純撮影の正面+側面)の被ばく線量に抑えられた。また、本撮影システムでは任意のポジションで撮影が可能のため、立位や座位にて撮影を行うことにより、日常生活と同様の体勢で呼吸運動を観察できるという特長を有する。

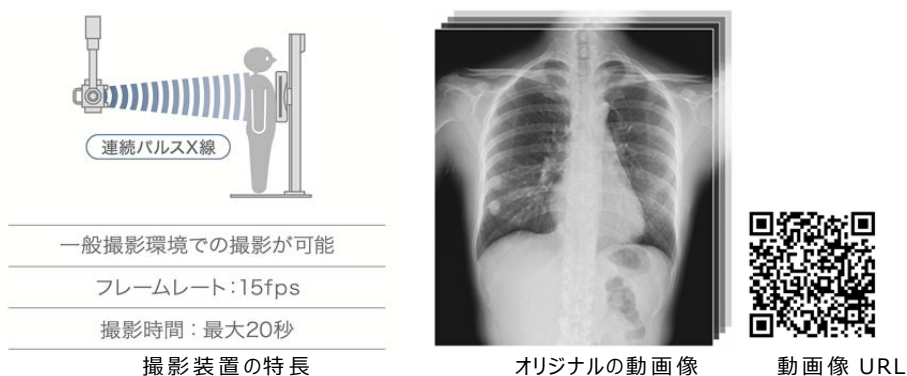


図2 X線動画撮影の概要

撮影された動画像(DICOM形式)がKINOSISサーバに転送されると、順次解析処理が自動的に実行される。動画像および解析結果はKINOSISクライアントで閲覧できる。さらにURL連携を行えば院内端末からもアクセスが可能のため、回線の確保が可能であれば、既存の電子カルテからシームレスな運用も可能にする(図3)。

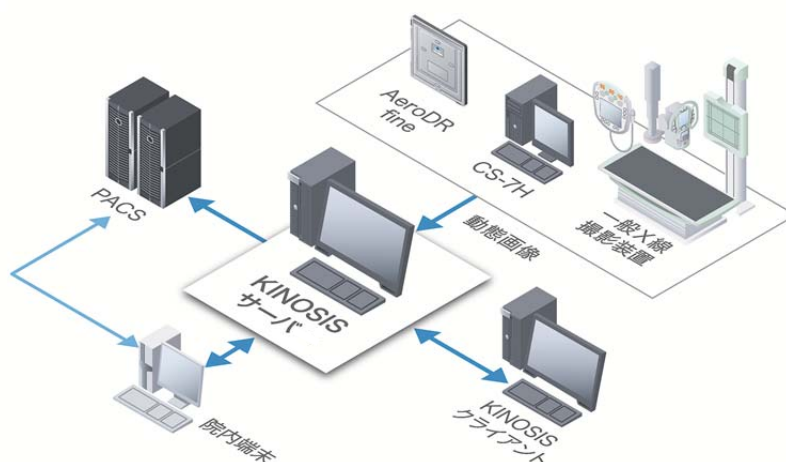


図3 システム構成

【胸部動態解析技術】

X線動画解析ワークステーションには、肺機能を評価するための画像処理技術が搭載されており、肺機能評価における臨床情報を診療現場に提供することができる。以下、各技術を紹介する。

(1) 胸部骨減弱処理(BS-MODE)

胸部骨減弱処理は、肺野内の肋骨および鎖骨の信号を減弱することで、血管影等の組織の観察を容易にする効果を有する。しかし、肋骨および鎖骨の構造・解剖学的配置は被写体間で個体差があり、骨の信号強度は骨の太さや撮影条件、および骨密度の違いによって異なる。これらの多種多様な画像に対して精度良く骨減弱を実現するため、当社の胸部骨減弱処理はパターン認識アルゴリズムにより骨領域を同定・減弱する手法を採用した³⁾。

骨領域の同定ステップでは、当社が保有するビッグデータから構築した骨モデルに基づく推定結果

と、対象画像から検出した被写体固有の骨構造の推定結果を合わせることで、被写体間でばらつきがある骨の構造を精度良く検出することができる。骨領域の減弱ステップでは、骨領域候補から信号強度を推定し、骨領域周辺にのみ補正を加える。当社の処理は、骨以外の血管影・異常影は元の信号から大きく変化させないため、相対的に骨以外の組織の視認性を向上することができる(図4)。

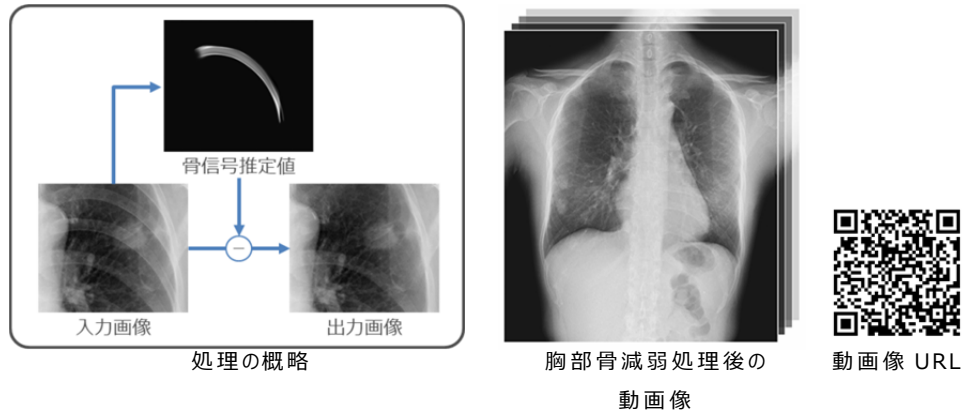


図4 胸部骨減弱処理による肋骨・鎖骨信号の減弱

(2) 周波数強調処理 (FE-MODE)

画像の精細さを表す指標である空間周波数の処理技術を紹介する。周波数強調処理は、画像内の特性の異なる空間周波数帯域を個別に強調させ、各フレームにその強調処理を行うことにより、任意の組織の動的視認性を向上する効果を有する。たとえば、血管影や肋骨の輪郭に最適化されたパラメータにて強調をおこなえば、肺動脈の走行や肺野内組織の局所的な動きの観察が容易になる(図5)。

呼吸に伴い、肺野内組織・上位肋骨・下位肋骨・浮遊肋はそれぞれ異なる生理的運動をすることが知られている⁴⁾。これらの動きを個別に観察することで、より正確な呼吸機能の把握および異常部位の検出に役立つことが期待されている。

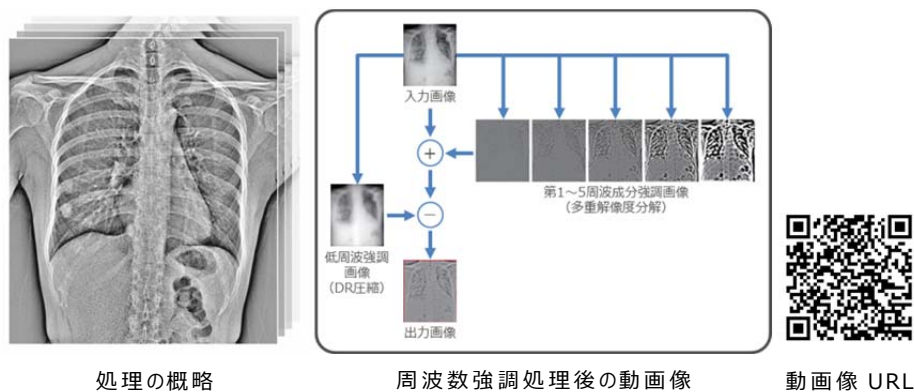


図5 周波数強調処理による構造物の視認性向上

臨床応用例として、癒着を有する肺がん症例を紹介する。図6にて、最大吸気位と最大呼気位の血管影を比較すると、青矢印の位置では血管影が呼吸に合わせて移動しているのに対し、赤矢印の位置では右肺胸壁と肺野内組織(葉間裂)の陰影が固定され、癒着により肺の動きが制限されていることが確認できる。このように、X線動画にて呼吸中の胸壁と血管影の位置関係を観察することで、癒着の有無や胸壁・大動脈浸潤肺がんの存在を判断できる可能性がある。胸部外科手術では癒着や浸潤の存在が、治療計画を立てる上で重要な要素となる。

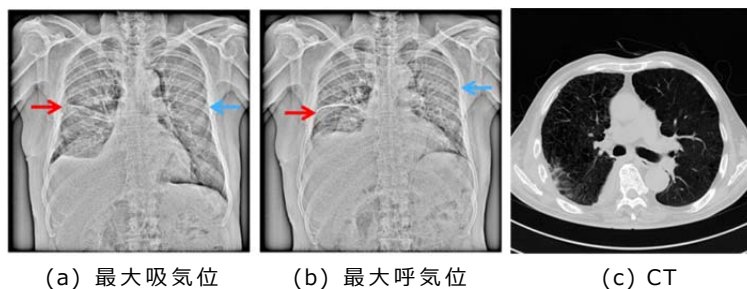


図6 血管影の動きから癒着の評価を行った症例

(a)(b)周波数強調処理により血管影を強調した画像、(c)癒着が疑われるCT画像

(3) 特定成分追跡処理 (DM-MODE)

特定成分追跡処理は、エッジ抽出処理とパターン認識処理を組み合わせることにより、特定の構造物の動きを追跡する技術である。KINOSIS では横隔膜に最適化されたパラメータを用い、呼吸に伴う横隔膜の動きを自動追跡し、上下方向の移動量の定量化を行うことができる。解析操作者および観察者は定量値に基づいた客観的評価が可能となる(図7)。

COPDなどの慢性呼吸器疾患の重症度分類等への応用を目指した臨床研究では、COPD患者は健常者に比べ横隔膜の動きに明らかな有意差があることが示されており、呼吸機能の新たな評価指標となることが期待されている⁵⁾。

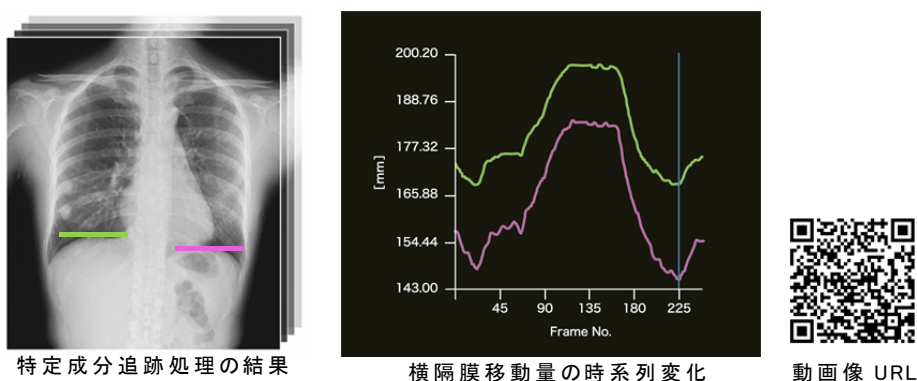


図7 特定成分追跡処理による横隔膜移動量の計測

臨床応用例として、横隔神経麻痺疑いを有する症例を紹介する。図8にて横隔膜移動量を表したグラフの性状を評価すると、左右の横隔膜の同期性が失われており、横隔神経麻痺である可能性が高いと判断された。

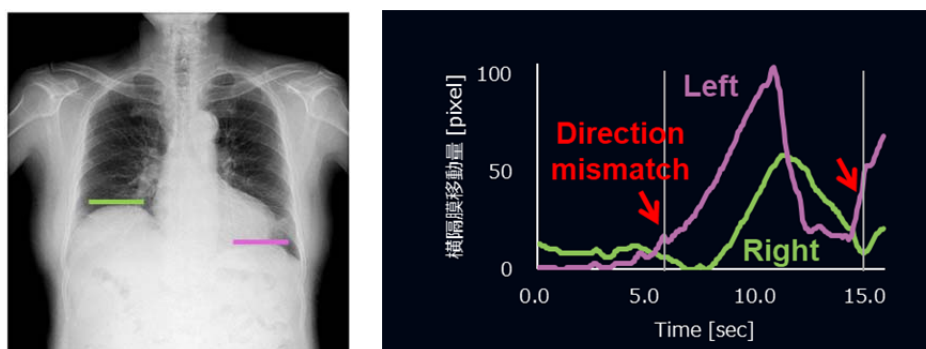
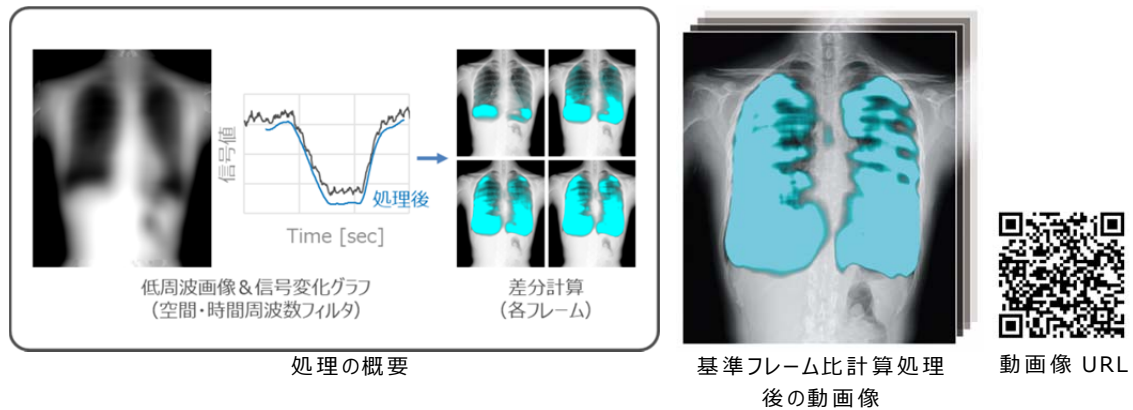


図8 横隔膜運動の同期性から横隔神経麻痺の評価を行った症例

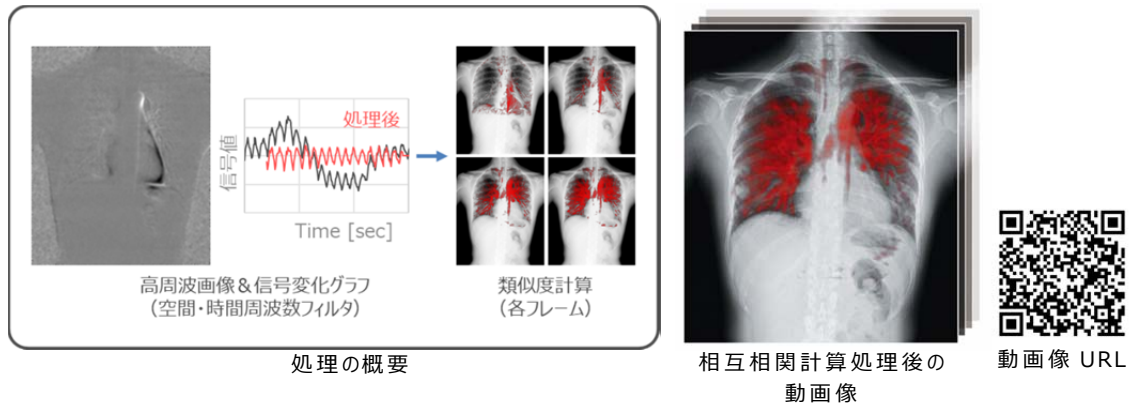
(4) 基準フレーム比計算処理 (PL-MODE) / 相互相関計算処理 (PH-MODE)

田中ら^{6, 7)}は、肺野内で計算した信号値変化の解析により、換気・血流分布を視覚化・定量化する技術を報告している。これらの技術を用いれば、手間やコストがかかる肺シンチグラフィを用いずとも、局所的な機能情報の評価ができる可能性がある。

当社は、肺胞や肺動脈などの肺野内組織の生理的機能に伴う信号値変化(X線透過量)を強調し、肉眼では認識困難な生体のわずかな変化を視覚化する技術を開発した。図9(a)の基準フレーム比計算処理 (PL-MODE)は、時間周波数フィルタ処理により呼吸に関連した周波数成分を抽出し、各画素にて最大呼気位からの変化量を視覚化する。つまり、X線動画上に呼吸に伴う肺野内組織の伸縮度合いを表現することができる。図9(b)の相互相関計算処理 (PH-MODE)は、心拍に関連した周期的な信号変化を抽出し、さらに左心室領域から抽出された信号波形(心拍波形)との類似度を計算し、視覚化する。



(a) 基準フレーム比計算処理



(b) 相互相関計算処理

図9 基準フレーム比計算処理 / 相互相関計算処理による呼吸・心拍関連周期信号の抽出

臨床応用例として、肺血流異常を有する症例を供覧する。図10(a)の基礎肺疾患の合併症を伴わない肺がん症例では、解析信号値(赤色)が肺全体に分布していることが観察できる。一方、図10(b)の肺気腫を合併した肺がん症例では、右上肺野の解析信号値(赤色)が低下しており、血流に異常があると推定できる。同症例の肺血流シンチグラフィでは右上肺野の集積が低下しており、相互相関計算処理後の動画像にてシンチグラフィと同様の傾向を表す可能性が示唆された。

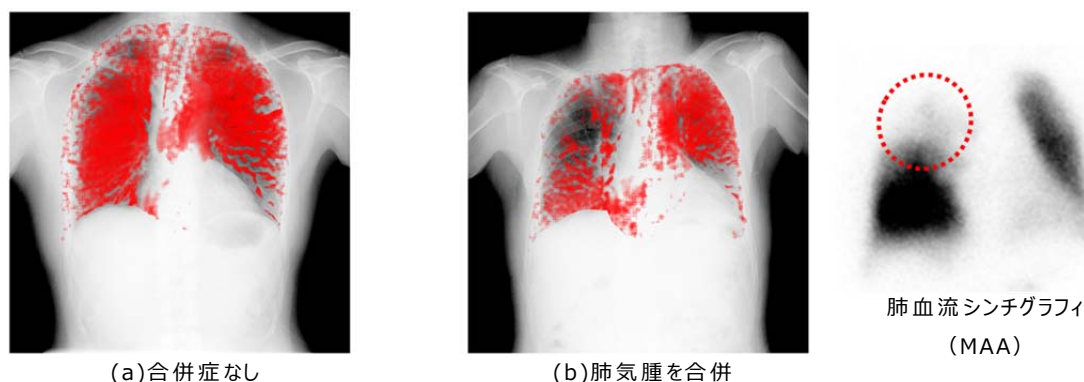


図10 相互相関計算処理により肺血流の評価を行った症例

【おわりに】

当社が開発した X線動画撮影の特長および動態解析を実現する画像処理技術について紹介した。X線動画撮影法は、CTや核医学などの高度画像診断よりも著しく簡便な方法で、これまでのスクリーニング検査よりも遥かに多くの診断情報を得られる期待がある⁸⁾。本稿では胸部領域の紹介に留めたが、動画による単純 X線撮影は、整形、摂食嚥下、救急等、さまざまな診療科での適応が期待されている。これまでにない動的診断情報を活かすべく、現在、国内外の複数施設にて臨床研究が進められ、生体生理機能の視覚化・定量化が示す臨床的有用性が認められつつある。

今後、被検者・医療従事者にとってより有用性の高い画像診断法として認知され、多くの診療現場で日常の診療に使われるよう、臨床価値の創出および機器開発に取り組む所存である。

【参考文献】

- 1) Aoyagi S. ワイヤレスカセットタイプ FPD AeroDR fine の開発. JIRA テクニカルレポート; 52:4-5, 2017.
- 2) IAEA, 1996. International Basic Safety Standard for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Source. Safety Series No.115.
- 3) Kobayashi T, Tsubura S, Katsuhara S, et al. Development of Bone Suppression Processing as an Application of Computer Aided Detection of Nodules in Chest Radiographs. KONICA MINOLTA Technology Report; 12:71-76, 2015.
- 4) 臨床検査 61/10 2017 年増刊号 呼吸機能検査 BASIC and PRACTICE.
- 5) Yamada Y, Ueyama M, Abe T, et al. D (“dynamic X-ray phrenicography”). European Journal of Radiology; 87:76-82, 2017.
- 6) Tanaka R, Tani T, Nitta N, et al. Pulmonary Function Diagnosis Based on Respiratory Changes in Lung Density With Dynamic Flat-Panel Detector Imaging: An Animal-Based Study. Investigative Radiology; 53(7):417-423, 2018.
- 7) Tanaka R, Tani T, Nitta N, et al. Detection of Pulmonary Embolism Based on Reduced Changes in Radiographic Lung Density During Cardiac Beating Using Dynamic Flat-panel Detector: An Animal-based Study. Academic Radiology; 2019.
- 8) Sanada S. Physiologic-functional Radiography (pfRAD): dynamic imaging for physiological and functional diagnostic information. Journal of Wellness and Health Care; 42(4):1-8, 2018.