

超音波検査におけるプローブ操作の影響と熟練度解析

The Impact of Probe Manipulation and Skill Level Analysis in Cardiac Ultrasound Examination

関根 大毅^{*1} 吉備 笙子^{*1} 三上 弾^{*1} 木原 尚比呂^{*2} 武井 康悦^{*2} 大和 淳司^{*1}
 Daiki Sekine Shoko Kibi Dan Mikami Takahiro Kihara Yasuyoshi Takei Junji Yamato

^{*1} 工学院大学

^{*2} 東京医科大学

Kogakuin University of Technology & Engineering Tokyo Medical University

Cardiac function is evaluated in echocardiography by acquiring cross-sectional heart images using a probe placed against the skin. Sonographers must develop advanced probe manipulation and image interpretation skills—often requiring around 10,000 cases for proficiency—which creates a significant training burden. To reduce this load, our study examines the impact of probe handling on diagnostic outcomes. During ejection fraction (EF) measurement via Simpson’s method, we recorded probe orientation with an inertial measurement unit (IMU) sensor and extracted eight statistical features. These features were used to build a random forest classifier that distinguishes novice from veteran operators, while SHAP analysis provided insights into feature importance. Our findings revealed that increased pitch rotation indicated novice handling, and lower roll variability correlated with higher image quality. Moreover, synchronizing roll and pitch to limit excessive pitch rotation emerged as a key technique for obtaining stable images. Future work incorporates positional data using a visible light camera and AR markers to further refine the analysis.

1. 背景と目的

心臓超音波検査は、心臓の断面画像(心断面)から心臓の大きさや動き、血液の流れなどの心機能を測定し、評価する一般的な検査である。心断面は、超音波を発生する心エコー用のプローブと呼ばれる装置を患者の胸部に直接当てることによって得られる。プローブは振動子によって1~10MHzの周波数の超音波を発信し、心臓に反射した波を受信する。受信した超音波を電気信号に変換することで、画像化される。したがって、検査技師にとって、明瞭な心断面を得るためのプローブ操作能力や、心断面から心臓の機能を読み取る能力は重要な要素であり、この習熟には約 10,000 件の検査経験が必要であるといわれている。

これまでの心臓超音波検査に関する研究は、心機能指標の自動測定^{[Wang 21][Yoshizumi 12][Yoshimura 05]}やシミュレーション訓練^{[Wang 22][Dang 22][Noori 24]}に焦点が当てられており、多くの場合、明瞭な心断面の存在や反復練習が前提とされている。しかしながら、明瞭な心断面を得るための定量的検討や技術習熟の向上に関する研究は限られている。また、少子高齢化に伴う技師不足や患者数の増加、医療経済的な負担も重要な課題である。さらに、以前の研究^[関根 23]では、EF 値計測におけるプローブの姿勢の動きを解析した。Simpson 法に基づけば、A4C から A2C までのプローブの x 軸周りの変化量は直交すると仮定されるが、実際の結果では約 45 度しか回転していないことが明らかとなった。また、EF 値計測では y 軸周りの動きが誤差要因として影響しやすいことも示された。なお、x 軸周りの回転については、A4C と A2C の短軸方向の長さがほぼ均一であるため、体積計測や EF 値算出に及ぼす影響は極めて小さく述べた。一方、y 軸周りの動きは幾何学的シミュレーションにより、EF 値を指数関数的に増加させる関係にあることも示されている。

我々の目的は、心臓超音波検査における技術力向上を支援し、習熟までに必要な検査件数を削減することである。したがって、本研究では、プローブの姿勢に関連する動きが心機能指標

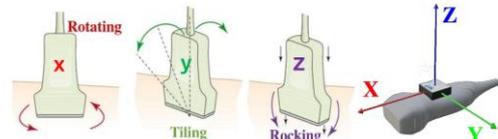


図 1. IMU センサの軸とプローブの姿勢・動きの関係

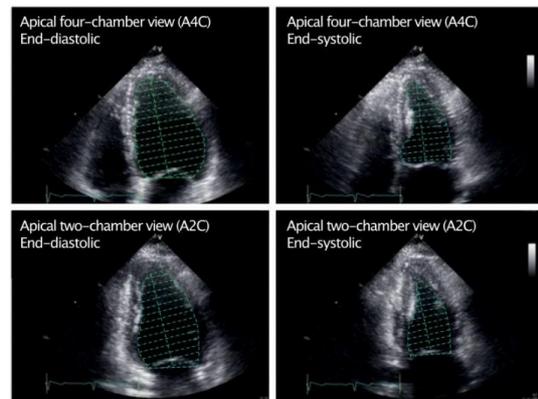


図 2. 拡張期と収縮期における A4C と A2C の心内膜トレース結果の様子^[CM 23]

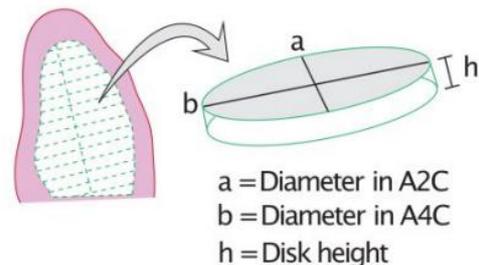


図 3. Simpson 法により左室容量を求めるイメージ^[CM 23]

連絡先: 大和淳司, 工学院大学, 東京都八王子市中野町
 2665-1 yamato@cc.kogakuin.ac.jp

連絡先: 関根大毅, 工学院大学, em23024@g.kogakuin.jp

の精度に与える影響と、経験年数によるプローブ姿勢の違いを検討する。

2. 方法

我々は、プローブに IMU センサ^[WiTmotion 23]を取り付け、プローブの姿勢のセンシングを行う。この IMU センサからの測定値は、カルマンフィルタを用いてジャイロのドリフトの補正を施した角度であり、z-y-x 順のオイラー角として表している。角度の精度は、±0.05 度である。また、分析はオイラー角 x-y-z 順で行い、これらは回転行列を用いて変換する。センサの各軸とプローブとの関係は図1に示し、各軸周りの回転が記録される。

本研究では、Simpson法を用いて得られる左室駆出率(EF値)計測の検査過程においてプローブの姿勢のセンシングを行う。Simpson法は文献^[アーエイヨ 23]によると、「直交する心尖部4腔断面と、心尖部2腔断面を用いて左室容積を求める。また、各断面間で長軸が5%以上異なる場合は、正しい計測とは言えない。」と記されている。一般的にSimpson法はModified Simpson法(ディスク法)が用いられ、左心室の心内膜全体を長軸方向に対して20等分し、等間隔の円盤の体積の総和により左室容積が求まる。体積の計算式は以下のとおりである。

$$V = \frac{\pi}{4} \sum_{i=1}^n a_i b_i \frac{L}{n}$$

V : 体積, n : 分割数, L : 長軸径,
 a_i : A2C 短軸径, b_i : A4C 短軸径

体積の計算においてA4CとA2Cは直交していると考えられる。

EF値は、拡張期に得られる左室拡張末期容量(LVEDV)と収縮期に得られる左室収縮末期容量(LVESV)により得られ、左心室が一回の心拍で放出する血液の割合を示す。EF値の計算式は以下のとおりである。

$$EF = \frac{(LVEDV - LVESV)}{LVEDV} \times 100$$

3. 実験

本研究では、熟練度の高い技師特有のプローブ操作の特徴がどのような点に現れるのかを解析するため、熟練と未熟練の操作を判別するための判別器の構築および特徴量の重要度解析を行った。以下に各項目の詳細を示す。

3.1 判別器の構築

熟練度の判別器として、ランダムフォレストを用いた。ランダムフォレストは、複数の決定木を組み合わせるアンサンブル学習手法であり、本研究では分類タスクに適応した。具体的なモデル式を以下に示す。また、学習時には損失関数としてジニ不純度を採用した。

(1) ランダムフォレストのモデル式

$$\hat{y} = \begin{cases} 1 & \text{if } \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i(x) \geq 0.5, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$h_i(x)$: i 番目の決定木による予測
 N : 決定木の数(今回は 100)

(2) 学習方法

$$(f^*, t^*) = \arg \min_{f \in F_s^{(j)}, t} \mathcal{L}(\mathcal{D}_b^{(j)}, f, t)$$

$\mathcal{D}_b^{(j)}$: データサブセット, $F_s^{(j)}$: 特徴量サブセット,
 f : 各特徴量, t : 分割基準

(3) ジニ不純度

$$\mathcal{L} = \frac{N_{left}}{N} \cdot \left(1 - \sum_{l=1}^L p_{l,}^2\right) + \frac{N_{right}}{N} \cdot \left(1 - \sum_{r=1}^R p_{r,}^2\right)$$

N_{left}, N_{right} : 分割後の左右ノードのサンプル数,
 L, R : クラスの数,

$p_{l,}^2, p_{r,}^2$: 左右ノード内でクラス l, r が占める割合

3.2 特徴量の抽出

次に、プローブ姿勢に関連する特徴量を抽出した。抽出した特徴量は大きく2種類に分類できる。ひとつは、A4CからA2Cまでのx軸y軸の姿勢変化量とその標準偏差に関するものであり、もうひとつは、0.6秒および1秒の時間窓におけるx軸とy軸の平均値、ならびに各時間窓内の平均値と標準偏差の相関係数である。合計8種類の特徴量を用い、判別に有効な特徴量を検討した。

3.3 熟練度の指標

熟練度の評価は、技師の経験年数と心断面評価値の2種類の指標を用いて実施した。まず、技師の経験年数を指標とするため、全被験者を対象に、経験年数に基づきベテラン4名(経験7年以上)とノービス5名(経験4年以下)の計9名に対して、各被験者が約10回の検査を実施した。次に、心断面評価値を指標とするため、検査映像に基づく5段階評価を用い、患者条件を統一する目的で評価対象をベテラン2名およびノービス3名の計5名に絞り、各被験者が約5回の検査を行った。なお、評価は専門医が担当し、評価値のうち「Good」「Fair+」の評価をベテラン、また「Fair」「Fair-」「Poor」の評価をノービスとして分類した。

3.4 特徴量重要度の評価

判別器の解釈のために、Shapley Additive exPlanations (SHAP) 値を用いて各特徴量の寄与度を定量的に評価した。SHAP値は、機械学習モデルの予測に対して各特徴量がどの程度影響を及ぼしているのかを数値化する指標であり、下式に示すとおりである。

(1) SHAP 値の式

$$\Phi_i = \sum_{s \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|! (|N| - |S| - 1)!}{|N|!} (v(S \cup \{i\}) - v(S))$$

Φ_i : SHAP 値,

S : 特徴量 i を除く特徴量集合, N : 全特徴量の集合,
 $v(\cdot)$: 特徴量に基づき予測されるモデルの出力

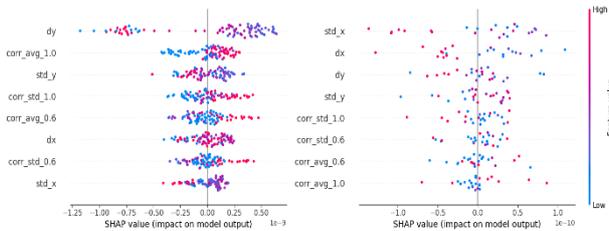


図 4. 分類モデルにおける SHAP 値散布図

(左: 経験年数に関する結果, 右: 心断面評価に関する結果)

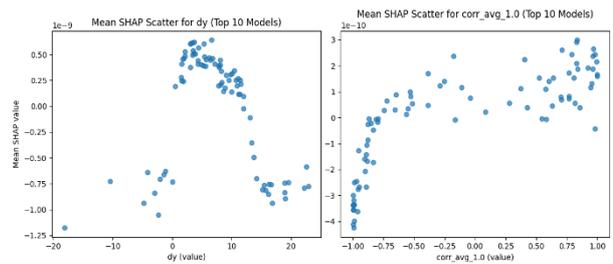


図 5. 経験年数分類において寄与度の高い特徴量の実測値と SHAP 値

(左: y 軸周りの変化量, 右: x 軸と y 軸の相関値)

3.5 精度評価

本研究における判別器の精度評価は、データセットを学習データ(80%)とテストデータ(20%)に分割し、100回の試行の平均値により評価を行った。なお、SHAP 値は全実行のうち上位 10%の精度を有するモデルを使用して、平均値により算出した。

4. 結果

4.1 経験年数とプローブ姿勢に関する結果

技師の経験年数を指標とした分類において、プローブ姿勢の特徴量を用いてランダムフォレストによる判別を試みたところ、平均分類精度は 71%を達成した。さらに、精度上位 10%のモデルにより平均 SHAP 値を算出した結果(図 4 左辺参照)、最も重要な特徴量として y 軸周りの姿勢変化量(dy)が浮かび上がった。これは、経験年数に基づくベテラン判別において、y 軸周りの回転量が大きな寄与を示していることを意味する。

具体的には、図 5 に示すように、横軸に各特徴量、縦軸にその特徴量重要度をプロットした結果、y 軸周りの回転量が+10 度以上や負の方向の回転の場合、ノービスであると判別される傾向が認められた。また、x 軸と y 軸の動きに正の相関が存在する場合は、ベテランであると判別されやすいことが示唆された。

4.2 心断面評価とプローブ姿勢に関する結果

心断面の評価値を用いた分類においては、ランダムフォレストの平均分類精度は 72%となった。精度上位 10%のモデルから算出した平均 SHAP 値の散布図(図 4 右辺参照)によると、画像の質に基づくベテラン判別においては、特に x 軸周りの標準偏差が大きな影響を持つことが確認された。

具体的な解析では、x 軸周りの動きの標準偏差が 20 度以上の場合、および x 軸周りの動きが-50 度以上の場合に、ノービスであると判別されやすい傾向が見られた(図 6 参照)。これらの結果は、心断面画像の質という観点からも、未熟練技師のプローブ操作における特徴的な動きが定量的に捉えられることを示している。

5. 考察とまとめ

本研究の結果から、プローブ姿勢の特徴量と技師の熟練度との関係について、いくつかの知見が得られた。以下、各知見に基づく考察を示す。以下、各知見に基づく考察を示す。

5.1 y 軸周りの変化量と熟練度の関係

本研究では、y 軸周りの姿勢変化量が 10 度以上の場合、経験年数の指標においてノービスと判別される傾向が認められた。この結果は、我々の研究^[10]において、EF 値の計測時に y 軸周りの変化量が誤差要因となりやすいことが示されている知見と一致する。すなわち、y 軸周りの大きな変化は、検査時の誤差を増

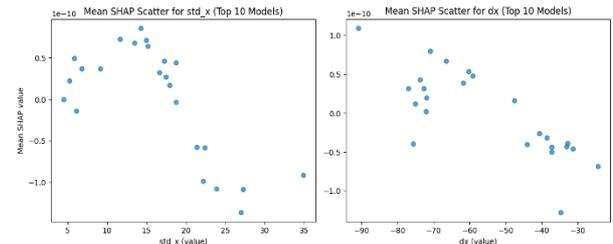


図 6. 心断面評価において

寄与度の高い特徴量の実測値と SHAP 値

(左: x 軸周りの標準偏差値, 右: x 軸周りの変化量)

大させる要因として働いていると考えられる。さらに、経験年数が蓄積されるにつれて、熟練技師は y 軸周りの動きを抑制する操作技術を習得している可能性があり、これがベテランの判別に寄与していると推測する。

5.2 x 軸と y 軸の連動性と熟練度

また、x 軸と y 軸の動きに正の相関がある場合、経験年数に基づく分類でベテランであると判別されやすいことが示された。EF 値計測においては、x 軸は必ず反時計回りに回転する性質があるため、x 軸と y 軸が同時に反時計回りに動く連動性が、熟練技師において獲得される操作特性であると考えられる。この連動性が、安定した心断面の取得と正確な計測に寄与している可能性が示唆される。

5.3 心断面の質とプローブ動作のばらつき

さらに、心断面画像の質という観点から、プローブ操作の安定性と画像の質との間に密接な関係があることを示している。熟練技師は、プローブを一貫して制御することで、心断面画像の質を維持または向上させ、正確な EF 値計測へつなげていると考えられる。一方、プローブの動作に大きなばらつきが生じる場合、心断面画像の質が低下し、結果として診断や評価の精度にも悪影響を及ぼす可能性を考察する。

5.4 まとめ

本研究では、技師の熟練度におけるプローブ操作の違いを、経験年数および心断面評価値の指標を通して解析した。その結果、y 軸周りの変化量の抑制、x 軸と y 軸の連動性が熟練技師の特徴として示唆された。これらの知見から、熟練度向上の結果、プローブ操作における動作の安定性が向上し、EF 値計測の精度改善につながると考えられる。また、これらを活用した支援システムは、プローブ操作の習得を促進するものと期待される。なお、現在は病棟内における磁場干渉対策や並進移動量を考慮した分析を目指して、可視光カメラと ArUco マーカーを

用いた位置・姿勢計測の高精度化や、支援システムの開発に取り組んでいる。

参考文献

- [Wang 21] Kai Wang, Jiwei Zhang, Takeshi Hozumi, Haiyuan Wu: Automated Segmentation of Left Ventricular Wall and Extraction of Left Ventricular Cavity in Echocardiographic Images by Deep Learning , IEICE Transactions on Information and Systems, IEICE, 2021.
- [Yoshizumi 12] Kiyoko Yoshizumi, Hiroyuki Tode, Yuki Okaniwa, Mihoka Iwasaki, Yasuyuki Kobayashi, Eiji Yamashita: Availability of Semi-automatic Measurements of Left Ventricular Volume and Ejection Fraction by 2D and 3D Echocardiography, Journal of Medical Ultrasonics, Springer, 2012.
- [Yoshimura 05] Naruhiro Yoshimura, Akira Shiozaki, Yutaka Hirano, Hisakazu Uehara, Tooru Masuyama: Endocardial Contour Extraction of Echocardiogram, IEEE Transactions on Medical Imaging, IEEE, 2005.
- [Wang 22] Wang, Heng; Dong, Shuang; Yang, Qi; Han, Jiancheng; He, Yihua; Wang, Shuangyi: A Virtual Ultrasonography Simulator for Skill Training Using Magnetic Inertial Probe Tracking , IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, IEEE, 2022.
- [Dang 22] Dang, Ziyue; Yang, Qi; Deng, Zhaokun; Han, Jiancheng; He, Yihua; Wang, Shuangyi: Digital Twin-Based Skill Training With a Hands-On User Interaction Device to Assist in Manual and Robotic Ultrasound Scanning, IEEE Journal of Radio Frequency Identification, IEEE, 2022.
- [Noori 24] Noori, Shahab; Ebrahimi, Mahmood; Uzunyan, Merujan; Bazyani, Dariush; Noori, Aryan J.; Siassi, Bijan; Ramanathan, Rangasamy: Effectiveness of Simulation Training in Acquiring Echocardiography Skills Among Neonatology Care Providers , American Journal of Perinatology, Thieme Medical Publishers, 2024.
- [WiTmotion 23] WiTmotion: WT901BLECLMPU9250. (参照: <https://www.wit-motion.com/>, 2023-07-23)
- [トアエイヨー 23] トアエイヨー: Simpson's method (シンプソン法), med.toaeiyo, (参照: <https://med.toaeiyo.co.jp/>, 2023-01-06)
- [CM 23] CardiovascularMedicine: Simpson's biplane method for calculation of ejection fraction (EF), ECG & ECHO LEARNING, ECG & ECHO LEARNING, 2023. (参照: <https://ecgwaves.com/>, 2023-09-10)
- [関根 23] 関根, 大和, 三上, 武井: 心臓超音波検査における技術力向上のためのセンサ情報の連携と分析, 第 62 回日本生体医工学会大会, 2023. (2023 年 5 月 20 日, 愛知, 日本)