

強化学習を用いた集束超音波における フェーズドアレイトランスデューサの位相制御

日大生産工(院) ○岩井 文哉 日大生産工 沖田 浩平

1. まえがき

近年、超音波を体内の特定の部位に集束させて治療する高密度集束超音波治療（High Intensity Focused Ultrasound : HIFU）¹⁾が注目されている。HIFU は低侵襲な医療技術であるため、患者の負担は少なくかつ高効率な治療を行うことができ、泌尿器科や眼科、腫瘍科などで応用が期待されている。しかし、体内の各臓器などの生体組織における超音波の反射・屈折による焦点のずれと拡散が発生し治療対象以外の健康な組織に影響を与える問題がある。これに対して、多数の小さな超音波素子を配列した集合体からなるフェーズドアレイトランスデューサを用いて焦点のずれや拡散を解決可能だが、超音波の伝播方向を決める位相遅延量の制御法は十分確立されていない。

一方、機械学習のひとつである強化学習は、人工知能を使った制御技術として代表的なものである。強化学習を用いた事例として、ゲームプレイ技術や精密なロボット制御などで深層強化学習を用いて学習して、高度なパフォーマンスを実行している。このように強化学習は、複雑な環境の中でも効率的に試行錯誤を繰り返すこと最適な行動選択を可能にしている。そのため位相遅延制御を最適化する方法として有効な手段だと考えられる。

本研究では、フェーズドアレイトランスデューサの制御を強化学習により最適化し、今後の HIFU 治療の適用の拡大、患者の負担軽減、経済効率の向上を目的とし研究を行う。

2. 強化学習による焦点制御

2. 1 強化学習

強化学習とは、与えられた環境と学習する

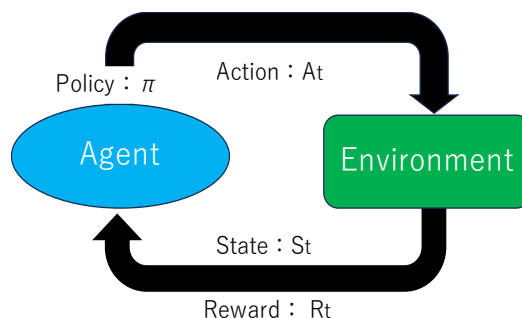


Fig.1 強化学習における学習の流れ

主体であるエージェントが相互に作用し、目標を達成するためにエージェントの行動から得られた価値（報酬）を最大化するまで行動のルールを改善しながら試行錯誤する学習方法である。学習の流れのイメージ図を Fig.1 に示す。まず、エージェントは環境の情報を状態 S_t として観測し、与えられた方策 π に従って行動 A_t を出力する。次に、その行動 A_t によって更新された環境は状態 S_{t+1} になり、それに対してエージェントが報酬 R_t を得て、それに応じて方策を改善し報酬が最大になるようにする。

2. 2 アルゴリズム

報酬が最大になるための方策を得るための強化学習のアルゴリズムとして Q-learning²⁾が挙げられる。Q-learning とは、エージェントが状態 S と行動 A の組み合わせに対する期待報酬を示す Q 値を更新しながら、最適な行動を学習する方法のひとつである。Q 値の更新式は次式で表される。

$$Q(S, A) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot Q(S, A) + \alpha(R_{t+1} + \gamma \cdot \max_{A'} Q(S_{t+1}, A')) \quad (1)$$

ここで、 $Q(S,A)$ は状態 S で行動 A をとった時の Q 値， α は学習率， γ は割引率， $\max Q(S_{t+1},A)$ は次の状態 S_{t+1} で可能なすべての行動 A についての Q 値の最大値である．次の状態 S_{t+1} で取れる行動に対して最大の Q 値を考慮しており，これによって最適な行動を見つけるための学習が実行できる．

3. 集束超音波への適応

フェーズドアレイトランスデューサによる集束超音波の音源から焦点位置までの簡易的なモデルを Fig.2 に示す．フェーズドアレイトランスデューサ内の音源に対応するものを音源 A, B とし，音源から焦点位置までの距離をそれぞれ d_A , d_B のような理想的な状況を考えるとき，焦点音圧 P は，時間 t ，音源 A および音源 B の位相遅延量をそれぞれ τ_A , τ_B として，次式で表される．

$$P = \sin\{2\pi f(t - d_A/c + \tau_A)\} + \sin\{2\pi f(t - d_B/c + \tau_B)\} \quad (2)$$

ここで，周波数 f および媒質の音速 c は定数と仮定した．式(2)において，焦点位置で音圧の値が最大になるような位相遅延量を強化学習により求める．位相遅延量の変化量を行動 A, 焦点音圧値 P によって報酬 R を与え，Q-learning による強化学習を実行した．

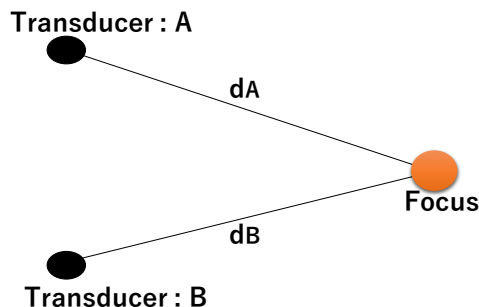


Fig.2 集束超音波治の簡易的なモデル

4. 実験結果および検討

まず，Fig.3 に ふたつの音源からなる最大の音圧値 P の変化の過程を示す．学習の中で最大の音圧値が更新されていき，エピソード後半では，更新が止まったため，最大なるための τ が取得できていると考えられる．

次に，音圧が最大となった場合に強化学習から得られた位相遅延量と理論的に求められる位相遅延量の値を比較する．理論値の式は

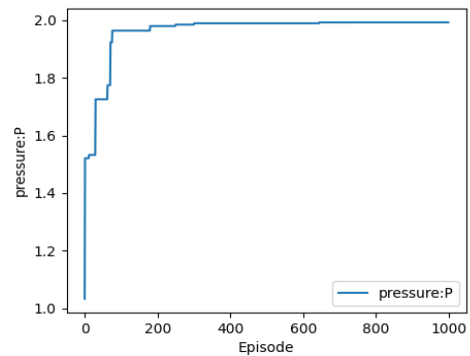


Fig.3 学習過程での音圧の値

Table 1 強化学習から得た位相遅延量

	$d(m)$	$\tau (s)$
A	0.083052	2.6894
B	0.066860	2.0922

$$\tau_A - \tau_B = \frac{(d_A - d_B)}{c} + \frac{n}{f} \quad (3)$$

ここで n は整数， f は振動数である．Table 1 には強化学習から得られた位相遅延量をまとめたものである． $d_A=0.083052m$ ， $d_B=0.066860m$ のとき，式(3)から理論値を求めると， $n=17916$ とした場合に $\Delta\tau = \tau_A - \tau_B = 0.5972s$ となる．次に，実際に強化学習より得られたものから求めると $\Delta\tau = 0.5972s$ ， $P_{max}(\tau_A, \tau_B) = 1.9964$ となる．得られた 2 つの $\Delta\tau$ を比較すると，ほぼ同じ値になっていることや P_{max} の値から強化学習から求めた位相遅延量は適切であると言える．

5. まとめ

集束超音波におけるフェーズドアレイトランスデューサの制御を強化学習により最適化する方法を調べた．結果としては，焦点位置で音圧を最大にするための位相遅延量を得ることができた．今後は，報酬の与え方やパラメータの設定を見直し，学習環境を改善にして精度の向上に努める．

参考文献

- 1) 佐々木 明，集束超音波治療の国際動向，医機学，Vol.82，No.4，2012
- 2) 伊藤真，強化学習を学びたい人が最初に読む本，日経 BP，2023 年 2 月 16 日