

深層強化学習に基づく致死性不整脈の適応的除細動システムの開発

Development of an adaptive defibrillation system for lethal arrhythmias based on deep reinforcement learning

富井直輝

東京大学先端科学技術研究センター tomii@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

Naoki Tomii, Research Centre for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo tomii@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

一旦発生した致死性不整脈に対して、電気ショックで不整脈を停止させる電氣的除細動は唯一の治療法である。一方で、除細動に用いられるエネルギーは大きく、患者の心臓へのダメージや痛みによる生活の質の低下が懸念される。これまでの基礎研究で、低いエネルギーの点通電刺激によるさまざまな除細動戦略が提案されてきた一方で、これらはシミュレーションまたは実験的計測手法による詳細な興奮状態の把握が前提とされており、効果的な低エネルギー除細動を臨床的に実現するための手法は確立していない。そこで本研究では、電極計測信号から心臓の興奮状態を把握し、点通電刺激のタイミングを制御することで効果的に不整脈を停止させる、深層強化学習にもとづく除細動AIを開発し、動物実験モデル上でその実現性を検証することを目的として検討を行った。

まず数値シミュレーションを用いたAI除細動器の強化学習の原理検証を行った。その結果、学習の進行にともなって除細動の成功率が60%程度まで上昇する例が見られた一方、学習の成否に電極配置が影響することが明らかとなった。次に、実際の動物標本上での強化学習の実現性を検討するための予備実験として、ウサギ摘出心臓標本に対する長時間電極計測・刺激実験を行い、標本の使用可能時間が30時間程度であり、時間的には強化学習が可能である事が明らかとなった。さらに学習済み除細動AIによる刺激の効果を検証するためのシステムとして、複数台カメラを用いた膜電位パノラマ計測システムを構築し、電気刺激の効果を心臓標本全体で計測可能であることが示された。今後はこれらのシステムを統合し、動物標本上での強化学習による適応的除細動AIの実現可能性を検証していく。

Electrical defibrillation is the only treatment available for lethal arrhythmias once they have occurred, which uses an electric shock to stop the arrhythmia. On the other hand, the energy used for defibrillation is high, and there are concerns about damage to the patient's heart and reduced quality of life due to pain. While basic research has proposed various defibrillation strategies using low-energy point-current stimulation, these have been based on detailed excitation state determination by simulation or experimental measurement methods, and no method has been established to clinically realise effective low-energy defibrillation. In this study, we developed a defibrillation AI based on deep reinforcement learning to effectively stop arrhythmias by understanding the cardiac excitation state from electrode signals and controlling the timing of point-current stimulation, and examined its feasibility in an animal experimental model.

First, the principle of reinforcement learning of the AI defibrillator was verified using numerical simulation. As a result, it was found that the success rate of defibrillation increased to about 60% as the learning progressed, and that the electrode placement affected the success or failure of the learning. Next, as a preliminary experiment to examine the feasibility of reinforcement learning on an actual animal specimen, a long-time electrode measurement and stimulation experiment was conducted on a rabbit explanted heart specimen, and it was found that the specimen could be used for about 30 hours, indicating that reinforcement learning was possible in time. Furthermore, a membrane potential panorama measurement system using multiple cameras was constructed as a system to verify the effect of stimulation by a learned defibrillation AI, and it was shown that the effect of electrical stimulation could be measured over the entire heart specimen. In the future, these systems will be integrated to verify the feasibility of adaptive defibrillation AI with reinforcement learning on animal specimens.