

修士学位論文要約（令和4年3月）

深吸気息止め照射における呼吸誘導システムの 制御特性改善に関する研究

堀池 巧

指導教員：本間 経康

Study on control characteristics improvement of breathing guiding system for deep inspiration breath hold in radiotherapy

Takumi HORIIKE

Supervisor: Noriyasu HOMMA

In radiotherapy, target tumor motion caused by the patient's breathing reduces the effectiveness and efficiency of the treatment. Deep inspiratory breath-hold (DIBH) is a major clinical technique used to mitigate breathing motion. In such clinical practice, patients voluntarily pause their breathing at the deep inspiration phase as planned by using breathing guiding systems (BGSs). However, patients often fail to hold their breathing at the planned position and timing, even with BGS. Control theory indicates that the failure of the BGS is possibly caused by undesired control characteristics of the feedback loop including the patient in the BGS. In this study, we first analyzed the characteristics of the BGS as a control system. Then we designed and implemented a new external controller to improve the BGS's characteristics. The experimental results showed that the BGS with the additional controller effectively suppressed the overshoot and thus potentially useful for more accurate and efficient DIBH.

1. はじめに

現在の臨床放射線治療では、呼吸により位置が変動する肺がんなどへの正確な照射を実現する手法として、深吸気息止め照射が広く利用されている¹⁾。このとき患者は深く息を吸って予め計画された呼吸状態で息を止めることが求められる。この計画された状態での息止めに補助するため、目標とする呼吸状態と現在の呼吸状態とを患者へ視覚フィードバックし、呼吸を誘導するシステムが利用されている²⁾。しかし従来のシステムでは、誘導に基づき息を止めても、呼吸の過不足により目標呼吸状態に未達となる失敗がしばしば発生し、治療時間が長時間化するという弊害の要因となっている。

呼吸誘導システムは、図1に示すように人を含むフィードバック制御系の一つである。よって息止めの失敗は、呼吸誘導システムの制御特性に起因して生じる目標呼吸状態に対しての偏差や行き過ぎと捉えることができる。そこで本研究では現在の呼吸誘導システムの制御特性を調べ、その制御特性を改善するような外部コントローラの導入やフィードバック方法の改良により、呼吸誘導下における計画時呼吸状態の再現性向上を試みる。

2. 呼吸誘導システムとその制御特性

現行呼吸誘導システムの制御特性を調べるため、図1のようにシステムを患者と計測・提示システムからなる閉ループ制御系としてモデル化し、外部入力付き

自己回帰 (ARX) モデルを用いてシステム同定を行った。同定したモデルにより深吸気息止め誘導を模した定値制御をステップ応答としてシミュレーションした結果、図2破線のように現行システムでは目標に対し行き過ぎや定常偏差が生じうる制御特性をもつことが分かった。深吸気息止めの誘導では、腫瘍への十分な線量の照射と健康組織の被ばく最小化のため、計画された位置への正確な再現が求められる。そのため、目標位置へ到達できないといった制御特性は改善する必要がある。

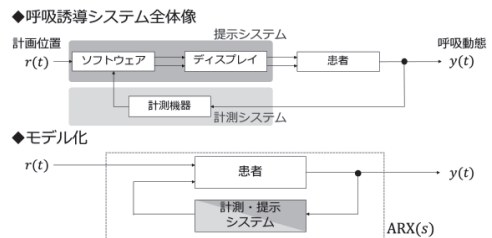


図1 呼吸誘導システムとそのモデル

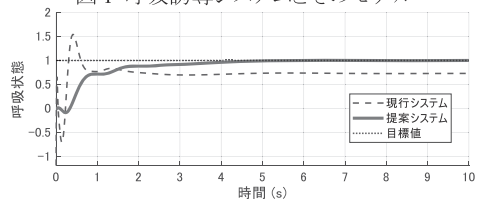


図2 シミュレーション結果

3. 呼吸誘導システムの制御特性改善

現行呼吸誘導システムの制御特性を改善するため、外部コントローラの導入を検討した。はじめに ARX モデルとして同定したシステムを図3のような線形時不変システム $G_{sys} = G_R / (1 + G_R H_{VF} G_{VR})$ へとあてはめ、この G_{sys} を制御対象として、その定常偏差を補償する外部コントローラ $C = K/s$ を設計した。ついで C を導入したシステム $CG_{sys} / (1 + CG_{sys})$ と等価で、かつ図3の計測・提示のサブシステム側に組み込み可能なコントローラ C' を導出した：

$$C' = \frac{s}{K_1 k} + \frac{1}{H_{VF} G_{VR}} + \frac{k-1}{k}$$

図2の実線は等価コントローラ C' を追加したシステムモデルのステップ応答である。 C' による定常偏差・行き過ぎ解消が確認できる。 C' は微分要素と比例要素から構成される。よって現在の呼吸状態を視覚提示する際に、その微分（すなわち呼吸の速度）に応じて提示情報を調整することで実装可能であり、息止め誘導の定常偏差・行き過ぎ抑制による呼吸状態再現性向上が期待される。

4. 呼吸誘導実験

4.1 実験方法

提案するコントローラ導入による呼吸誘導の制御特性改善の効果を検証する実験を行った。準備セッションでは、システム同定のための実験データを得るために自由呼吸の呼吸誘導を行った。誘導セッションでは、20秒間の息止め誘導を手法1~3の3種類で各2回ずつ息止め誘導した。ここで、手法1は現在の呼吸動態を加工なく提示（従来法）、手法2は直前のシステム同定から得た現在コントローラを介した提示（提案法）、手法3は時間変化への影響を調べるため1~2日過去の同定に基づくコントローラを介した提示を行う。深吸気息止め呼吸誘導の評価には、誘導直後の吸息により生じる最大到達位置誤差を行き過ぎ量、また誘導20秒間の目標位置との平均絶対パーセント誤差 (Mean Absolute Percentage Error; MAPE) を位置再現性評価指標として用いた。

4.2 実験結果・考察

表1に評価指標の手法別平均値を示す。行き過ぎ量は、現在の制御特性を改善する現在コントローラを用いた手法2で最小となった。速度情報が加えられて提示されるため、深吸気直前などの吸息の速度が大きい場所において将来的な行き過ぎを示唆し、被験者に吸息を抑えるような呼吸を促し、行き過ぎ量を抑制できたと考えられる。また、位置再現性評価指標値 (MAPE) は、手法1の従来法において最小となった。しかし、手法2の提案法による誘導誤差は、一部の被験者では従来法よりも小さく、位置再現性が向上することが確認できた。

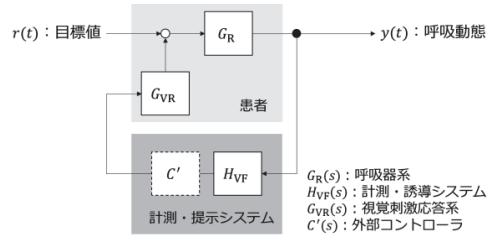


図3 外部コントローラの導入

表1 評価指標手法別平均値

	行き過ぎ量 (%)	MAPE (%)
手法1	13.4	4.7
手法2	11.6	5.6
手法3	15.7	7.8

本研究では制御特性解析からコントローラ設計・実装までモデルに線形・時不変性を仮定した。一方、システム同定時からの経過時間が長い手法3で、各性能指標が悪化したように実際の呼吸誘導システムの制御特性には時変性が見られる。加えて、非線形性が強いなど線形時不変モデルの効力が低い場合には、時変性・非線形性を加味した新たなコントローラ設計、あるいは外部コントローラなしでの特性改善の工夫が必要である。なお、線形時不変の外部コントローラの効果が低い場合であっても、行き過ぎの抑制など基本的な制御特性の改善の観点からは、速度情報フィードバック自体には効果があるとも考えられる。したがって、速度情報を視覚的に認知させるため呼吸動態の履歴を提示する方式によっても一定の制御特性改善や位置再現性向上が期待できる。

5. おわりに

本研究では、放射線治療における深吸気息止め誘導の呼吸息止め位置再現性向上を目的として、現在の呼吸誘導システムの制御特性を分析し、コントローラ導入による特性改善を試みた。提案法により、行き過ぎ量抑制など制御特性の改善可能性が示された。時変性・非線形性を踏まえた設計やフィードバック方法の工夫など、より患者個人に適したコントローラや誘導方法を分析・実装することが今後の課題である。

文献

- 1) Anastasi, G. *et al.* Patterns of practice for adaptive and real-time radiation therapy (POP-ART RT) part I: Intra-fraction breathing motion management. *Radiother. Oncol.* **153**, 79–87 (2020).
- 2) Pollock, S., Keall, R. & Keall, P. Breathing guidance in radiation oncology and radiology: A systematic review of patient and healthy volunteer studies. *Med. Phys.* **42**, 5490–5509 (2015).