

کنترل دینامیکی، روشی نو در کنترل سیگنالهای نابهنجار قلب

جاوید ضیائی، سهراب بهنیا، سمیرا فتحی زاده

گروه فیزیک، دانشگاه صنعتی ارومیه

چکیده

در این مطالعه روش جدیدی برای کنترل و حذف آشوب در سیگنالهای نابهنجار و نارسای قلبی ارائه می شود. بدین منظور، رفتار الکتریکی سیستم قلبی با استفاده از یک معادله دیفرانسیل تاخیری شبیه سازی شده و دینامیک آن با استفاده از نظریه آشوب مورد مطالعه قرار می گیرد. پس از تشخیص نواحی آشوبناک، سعی در حذف و کنترل این نوع رفتار بعنوان یکی از عوامل اصلی در بروز بیماریهای قلبی می شود. روش مورد استفاده، با نام روش کنترل دینامیکی، اخیراً توسط نویسنده ارائه شده است و می تواند بعنوان روشی جدید در طراحی ضربان سازهای مصنوعی قلب مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعات اخیر بر بروز رفتار آشوبناک در سیگنالهای نارسای الکتریکی قلب تاکید دارد. با توجه به اینکه سیگنالهای طبیعی قلب، رفتاری متناوب و غیرآشوبناک دارند، لذا کنترل آشوب در سیستم قلبی یک امر اجتناب ناپذیر در بازگرداندن رفتار الکتریکی پالسهای قلب به حالت طبیعی دارد. روشهای غیرخطی که تاکنون برای کنترل ارائه شده اند عبارتند از: روش OGY [1]، TDF [2]، ETDF [3]. علیرغم اینکه روشهای فوق الذکر روشهای کارآمدی می باشند نقاط ضعفی نیز دارند. مهمترین اشکال روشهای فوق الذکر عدم توانایی در تشخیص بموقع زمان کنترل است. روش ارائه شده در مقاله قلبی ما [4]، با بهره گیری از ویژگیهای آشوب توانایی غلبه بر این مشکل را داراست. به همین منظور از مدل ارائه شده در [5] برای شبیه سازی رفتار الکتریکی قلب استفاده می کنیم. تحلیل دینامیکی مدل مورد مطالعه نیز با استفاده از آنالیزهای سری زمانی، دوشاخه شدگی و بعد تعمیم یافته انجام می شود.

مدل ریاضی

مدل ریاضی مورد مطالعه در سال ۲۰۰۹، توسط گروهی از پژوهشگران برزیلی [5] برای تولید سیگنالهای ECG که فعالیت الکتریکی قلب را نشان می دهند، ارائه شد. این مدل ارتباط مستقیمی بین پارامترهای فیزیولوژیکی موثر در تولید و انتشار سیگنالهای قلبی با پارامترهای ریاضی ایجاد می کند. مدل مورد نظر بصورت زیر می باشد که در آن

$$x_i^{t_k} = x_i(t - \tau_k) \text{ می باشد.}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -\alpha_1 x_2 (x_1 - \beta_{11})(x_1 - \beta_{12}) - x_1 (x_1 + \chi_{11})(x_1 + \chi_{12}) + \gamma (x_1 - x_3^{t_1}) \\ \dot{x}_3 = x_4 \\ \dot{x}_4 = -\alpha_2 x_4 (x_3 - \beta_{21})(x_3 - \beta_{22}) - x_3 (x_3 + \chi_{21})(x_3 + \chi_{22}) + \eta (x_3 - x_5^{t_2}) \\ \dot{x}_5 = x_6 \\ \dot{x}_6 = -\alpha_3 x_6 (x_5 - \beta_{31})(x_5 - \beta_{32}) - x_5 (x_5 + \chi_{31})(x_5 + \chi_{32}) \end{cases}$$

$$ECG = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_3 + \beta_3 x_5$$

روش کنترلی

روش کنترلی ارائه شده [4] بر این اساس است که با جفت کردن عضوی از خانواده نگاشتهای یک بعدی سنجه پذیر با معادله تحول اصلی سیستم دینامیکی بصورت زیر، می توانیم رفتار آشوبناک را کنترل کنیم. در رابطه زیر

$$x \in \mathbb{R}^6, \kappa \in \mathbb{R}^1$$

در رابطه بالا می باشد.

$$\dot{x} = F(x, \kappa_n), \quad \kappa_{n+1} = \frac{4\kappa_n}{(1 - \kappa_n)^2}$$

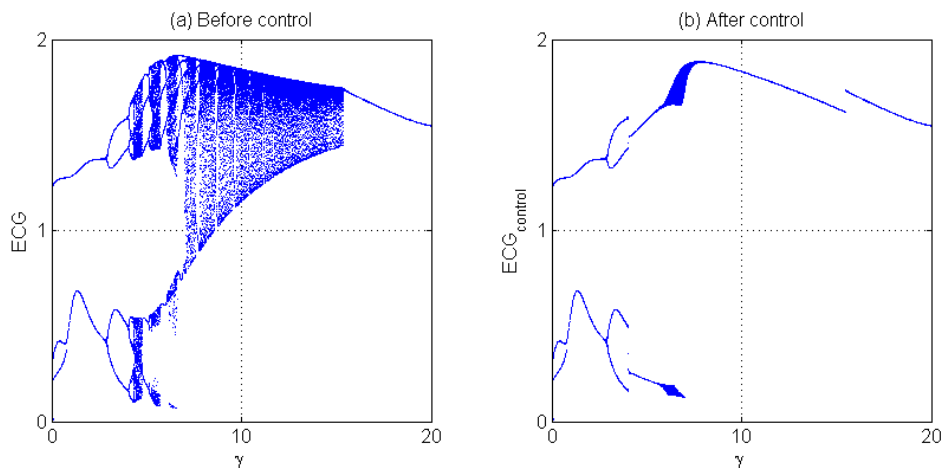
خانواده نگاشتهای یک بعدی ارائه شده، تعمیم نگاشت لاجستیک در بازه $[0,1]$ هستند، و برحسب تابعی از چندجمله ای های چبیشف نوع ۱ بصورت زیر تعریف می شوند.

$$\Psi_N(\kappa, \zeta) = \frac{[\zeta T_N(\sqrt{\kappa})]^2}{1 + (\zeta^2 - 1)[T_N(\sqrt{\kappa})]^2}, \quad \Psi_2(\kappa, \zeta) = \frac{[\zeta(2\kappa - 1)]^2}{4\kappa(1 - \kappa) + [\zeta(2\kappa - 1)]^2}.$$

عضو دوم این خانواده بصورت $\Psi_2(\kappa, \zeta)$ تعریف شده است. با استفاده از نگاشت معکوس پذیر $h = (1 - \kappa)/\kappa$ می توانیم این نگاشت را به بازه $[0, \infty)$ تبدیل کنیم که با کمی محاسبات ریاضی به شکل زیر ساده می شود.

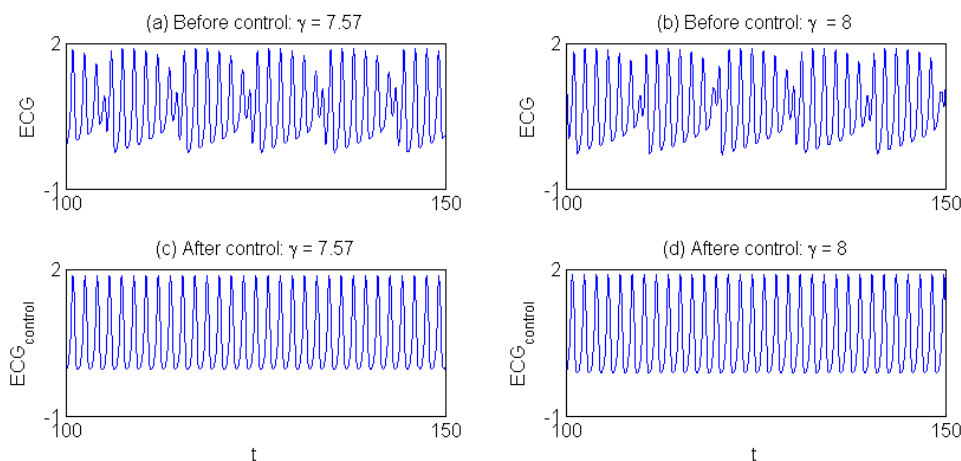
$$\kappa_{n+1} = \tilde{\Psi}_2(\kappa, \zeta) = h \circ \Psi_2 \circ h^{-1} = \frac{1}{\zeta^2} \tan^2(2 \tan^{-1}(\sqrt{\kappa_n})) = \frac{4\kappa_n}{\zeta^2(1 - \kappa_n)^2}, \quad \zeta = 1.$$

نتایج



شکل ۱: نمودار دو شاخه شدگی (a) قبل از اعمال کنترل و (b) بعد از اعمال کنترل

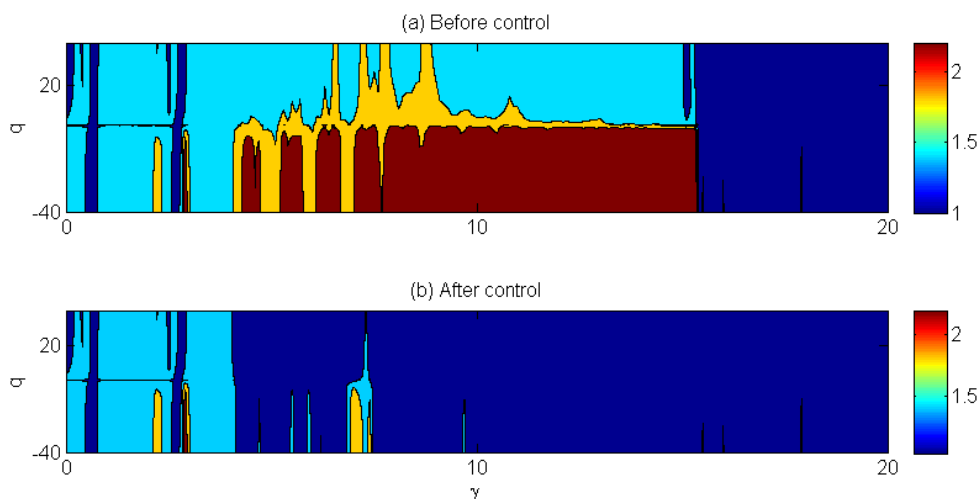
نمودار دوشاخه شدگی قبل و بعد از اعمال کنترل در شکل ۱ نشان داده شده است. نمودار (a) بخوبی تاثیر افزایش ضریب جفت شدگی γ را روی دینامیک سیستم قلبی به نمایش می گذارد. پیداست که سیستم ابتدا دارای رفتار طبیعی و منظم می باشد. افزایش تدریجی مقدار پارامتر کنترل γ ، از بین رفتن تناوب بین پیک های متوالی ECG را به همراه دارد، بگونه ای که پس از $\gamma = 4.04$ شاهد تولید پیکهای متوالی با دامنه های متفاوت هستیم (شکل ۲).



شکل ۲: نمودارهای سری زمانی سیگنالهای ECG قبل و بعد از کنترل

با ادامه همین روند تمایل سیستم به بروز رفتار نابهنجار و آشوبناک بیشتر شده و نهایتاً در بازه $[4.04, 15.87]$ تبدیل به رفتار کاملاً آشوبناک می شود. در این بازه، پنجره های کوچک با رفتار منظم نیز نمایان است. نمودار (b) شکل ۱

تأثیر روش کنترلی را که بعد از گذر سیستم به ناحیه آشوبناکی ($\gamma = 4.04$) روی سیستم اعمال شده است نشان می‌دهد. واضح است که ناحیه آشوبناک بصورت کامل حذف شده و تبدیل به رفتار منظم دوره ای گردیده است. جزئیات بیشتر را می‌توان از روی سری زمانی (شکل ۲) نیز بررسی نمود. شکل ۲ نمودار سری زمانی سیگنالهای ECG تولید شده را برای دو حالت مختلف $\gamma = 8$, $\gamma = 7.57$ که بصورت تصادفی انتخاب شده اند را قبل و بعد از اعمال کنترل نشان می‌دهد. آشکارا، رفتار آشوبناک غیرمتناوب و نابهنجار، بعد از کنترل تبدیل به رفتار منظم با دوره تناوب ۲ شده است. تحلیل دیگر بکار برده شده برای مطالعه تأثیر روش کنترلی بعد فرکتالی تعمیم یافته (D_q) است که معیاری از پیچیدگی و تعداد مولفه های موثر در دینامیک سیستم قلبی می باشد. نتایج بدست آمده از این تحلیل بصورت حرارتی در شکل ۳ آورده شده است. همانگونه که معلوم است این نمودار توافق خوبی با نمودار دوشاخه شدگی دارد. با اعمال کنترل دینامیکی، بوضوح بعد فرکتالی تعمیم یافته سیستم در ناحیه آشوبناک کاهش یافته است، و این به آن معناست که پیچیدگی دینامیک سیستم قلبی پس از کنترل بشدت افت کرده است.



شکل ۳: نمودار حرارتی تغییرات D_q برحسب q و γ قبل و بعد از کنترل

نتیجه گیری

در این مقاله، رفتار دینامیکی سیگنالهای الکتریکی ECG قلب تحت تأثیر تغییر یکی از پارامترهای موثر، با استفاده از یک مدل تاخیری بصورت عددی شبیه سازی شده و با استفاده از نمودار دوشاخه شدگی نواحی آشوبناک تعیین شد. سپس برای حذف رفتار آشوبناک، یک روش کنترلی غیرخطی بر پایه خانواده ای از نگاشتهای یک بعدی سنجه پذیر ارائه شد. نتایج بدست آمده نشان داد که روش ارائه شده می‌تواند بصورت کامل رفتار آشوبناک را از این سیستم حذف کند و می‌تواند بعنوان روشی جدید برای طراحی و ساخت ضربان سازهای مصنوعی قلب مورد استفاده قرار گیرد.

در پایان از جناب دکتر فیروز قادری پاکدل که در تفسیر نتایج پزشکی کمک شایانی کرده اند تشکر می‌کنیم.

مرجع ها

1. E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke, Controlling chaos, *Physical review letters* **64** (11) (1990) 1196.
2. K. Pyragas, Continuous control of chaos by self-controlling feedback, *Physics Letters A* **170** (6) (1992) 421-428.
3. K. Pyragas, Delayed feedback control of chaos, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **364** (1846) (2006) 2309-2334.
4. S. Behnia, A. Akhshani, Dynamical control of chaos by slave-master feedback, *Chaos, Solitons & Fractals* **42** (4) (2009) 2105-2114.
5. S. R. Gois, M. A. Savi, An analysis of heart rhythm dynamics using a three-coupled oscillator model, *Chaos, Solitons & Fractals* **41** (5) (2009) 2553-2565.