



طراحی کنترلر LQR برای هدایت اتومبیل و حفظ فاصله طولی از اتومبیل راهنما و تست کنترلر در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت

محمد حسن علیائی^۱، مریم فرخی^۲، نجمه اقبال^۳

- ۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران
- ۲- کارشناسی ارشد مهندسی برق کنترل دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران
- ۳- دکتری مهندسی برق کنترل و هیئت علمی دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد، ایران

* mh.olyaei123@sadjad.ac.ir

ارسال: شهریور ماه ۹۶ پذیرش: مهر ماه ۹۶

چکیده

امروزه سیستم‌های هوشمند در حوزه حمل و نقل شهری توسعه فراوانی داشته‌اند. حضور شرکت‌های مختلف در این زمینه، باعث تولید وسایل نقلیه هوشمند از جمله اتومبیل‌های خودگردان، هواپیماهای بدون سرنشین شده است. هسته اصلی این وسایل نقلیه که وظیفه تصمیم‌گیری و هدایت آن‌ها را دارد، کنترلرهایی است که توسط مهندسين کنترل، طراحی می‌شوند. سیستم توصیف شده در این مقاله شامل یک اتومبیل راهنما و یک اتومبیل پیرو است. هدف این است که اتومبیل پیرو در تمام لحظات فاصله ایمن خود را نسبت به اتومبیل راهنما حفظ کند و همچنین با افزایش یا کاهش سرعت اتومبیل راهنما، اتومبیل پیرو نیز سرعت خود را به شکل متناسب تغییر دهد. برای این منظور ابتدا روش کنترلی غیربهرینه جایابی قطب استفاده شده و سپس کنترلر بهینه LQR طراحی شده است. با مقایسه پاسخ‌های سیستم حلقه بسته، مشاهده شده است که کنترلر بهینه LQR، عملکرد مطلوب‌تری نسبت به روش کنترلی غیربهرینه جایابی قطب دارد. در نهایت با افزودن اغتشاش و عدم قطعیت مانند گاز و ترمز ناگهانی اتومبیل راهنما، عملکرد کنترلر و سیستم حلقه بسته بررسی شده است و نتایج نشان می‌دهد که کنترلر به خوبی طراحی شده و اتومبیل پیرو در برابر این اغتشاشات مقاوم بوده و عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: کنترلر LQR، جایابی قطب، اتومبیل راهنما، اتومبیل پیرو، حمل و نقل

۱. مقدمه

پژوهش و تحقیقات زیادی در زمینه حمل و نقل و ترافیک شهری انجام شده است. به عنوان مثال در مرجع [۱] درباره روش PID تطبیقی برای کنترل حرکت طولی یک اتومبیل خودگردان تحقیق شده است. اتومبیل‌های خودگردان بررسی شده در این مرجع، از نوع اتومبیل‌هایی با ۴ چرخ متحرک و اتومبیل‌هایی با ۲ چرخ متحرک می‌باشند و نیز پارامترهای کنترلر PID توسط شبکه عصبی پس‌انتشار خطا (BP) محاسبه شده‌اند. در مرجع [۲] و [۳] نیز درباره استفاده از کنترلر LQR به منظور کنترل

اتومبیل‌های بدون سرنشین است. مرجع [۳] روی کنترل حرکت طولی اتومبیل متمرکز شده است و با روش فیدبک حالت کنترل سیستم را انجام می‌دهد. در مرجع [۴] نیز درباره کنترلر MPC که کنترلی پیش‌بین است، توضیح داده شده است. این کنترلر بعد از هر نمونه‌برداری، وضعیت آینده حالت‌ها و خروجی‌های سیستم را پیش‌بینی کرده و توسط فیدبک حالت، مقدار ورودی مناسب سیستم را به گونه‌ای تعیین می‌کند که مقدار تابع هزینه مساله، به حداقل مقدار خود برسد. همین ویژگی باعث شده است که کنترلر MPC در برابر اغتشاشات مقاوم بوده و پاسخ مطلوب را فراهم کند. برای کنترل یک وسیله نقلیه، عواملی مانند سرعت، شتاب، فاصله طولی و عرضی مناسب، چرخش، میزان گاز و ترمز و آرامش سرنشینان برای ما اهمیت دارد. در هر مساله، با توجه به نیاز، کنترلرها برای مقصود خاصی طراحی می‌شوند. به عنوان مثال برای اتومبیل‌های مسابقه، سرعت و شتاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و کنترلر به گونه‌ای طراحی می‌شود که سرعت و شتاب لازم برای اتومبیل فراهم آورد و نیز برای اتومبیل‌های شخصی، آرامش و امنیت مسافین و فاصله طولی و عرضی مناسب از سایر اتومبیل‌ها، در اولویت قرار دارند، به همین دلیل کنترلر در این سیستم به گونه‌ای طراحی می‌شود تا دقت لازم را در هدایت اتومبیل داشته باشد. حرکت اتومبیل‌ها به دو نوع تقسیم می‌شوند. ۱. حرکت طولی و ۲. حرکت عرضی. حرکت طولی شامل حرکت اتومبیل به سمت جلو و عقب و حرکت عرضی شامل حرکت اتومبیل به سمت راست و چپ می‌باشد. به همین ترتیب فاصله اتومبیل از اتومبیل‌های سمت جلو و عقب را فاصله طولی و فاصله اتومبیل از اتومبیل‌های سمت راست و چپ را فاصله عرضی می‌نامند. در شکل ۱، حرکت طولی و در شکل ۲، حرکت عرضی اتومبیل را مشاهده می‌کنید. برای این دو نوع حرکت و حفظ فاصله ایمن کنترلرهای مختلفی می‌توان تعریف کرد.



شکل ۱- حرکت طولی اتومبیل



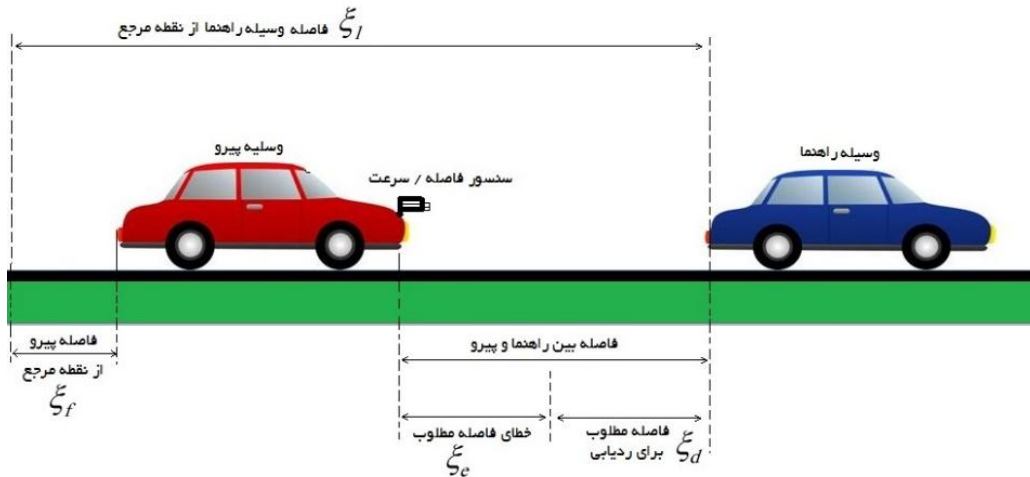
شکل ۲- حرکت طولی اتومبیل

مساله‌ای که در این مقاله بررسی شده است شامل ۲ عدد اتومبیل "راهنما" و "پیرو" می‌باشد که اتومبیل پیرو، پشت اتومبیل راهنما با فاصله‌ای تعریف شده حرکت می‌کند. این فاصله توسط سنسوری که بر روی اتومبیل پیرو نصب شده است، اندازه‌گیری شده و به کنترلر منتقل می‌شود. شکل ۳ جزئیات مساله را بیشتر مشخص می‌کند. هدف در این مقاله کنترل اتومبیل پیرو می‌باشد. تمرکز ما در این مقاله بر روی کنترل حرکت طولی اتومبیل است و به دنبال طراحی کنترلی هستیم که فاصله طولی ایمن و مطلوب نسبت به اتومبیل راهنما، آرامش سرنشینان اتومبیل پیرو و تغییرات آرام و ملایم سرعت اتومبیل پیرو را به همراه داشته باشد.

نحوه سازماندهی بخش‌ها در این مقاله به شرح زیر است: ۲. مدل سازی سیستم و شرح کلی سیستم، ۳. خطی سازی سیستم، ۴. بررسی کنترل پذیری و رویت پذیری سیستم، ۵. طراحی کنترلر، ۶. وضعیت حالت ها در حضور و عدم حضور کنترلر و نمایش تابع هزینه، ۷. تست کنترلر و سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاشات، ۸. نتیجه گیری

۲. مدل سازی سیستم

برای مدل سازی فرآیند، شکل ۳ را در نظر می گیریم.



شکل ۳- مدل سازی سیستم

قبل از مدل سازی حرکت در راستای طولی وسایل نقلیه، ابتدا چند شرط را لحاظ می کنیم. الف) فرض می شود که منظور از حرکت تنها حرکت انتقالی باشد. ب) حرکت وسایل نقلیه نرم لحاظ شود. با توجه به شرایط بالا و استناد به مرجع [۳] پارامترهای سیستم به صورت جدول ۱ تعریف می شوند.

جدول ۱- پارامترهای محاسبه شده در دو مقطع

نام پارامتر	توضیح	واحد اندازه گیری
ξ_l	فاصله اتومبیل راهنما از یک مبدا مشخص	m
ξ_f	فاصله اتومبیل پیرو از یک مبدا مشخص	m
ξ_d	فاصله مطلوب که بین دو اتومبیل راهنما و پیرو باید حفظ شود.	m
ξ_e	خطای موجود بین فاصله مطلوب و فاصله به دست آمده.	m
V_l	سرعت اتومبیل راهنما	m/s
V_f	سرعت اتومبیل پیرو	m/s
a_l	شتاب اتومبیل راهنما	m/s ²
a_f	شتاب اتومبیل پیرو	m/s ²
m	وزن اتومبیل	Kg
δ_f	ورودی موتور اتومبیل	Constant
τ_f	ثابت زمانی اتومبیل	s
K_{ad}	کشش اپرودینامیک اتومبیل	Constant
K_{md}	کشش مکانیکی اتومبیل	Constant
μ_{fc}	ورودی سیستم که افزایش یا کاهش شتاب در کنترل اتومبیل را به عهده دارد.	Constant

بنابراین دینامیک اتومبیل در حال حرکت بر روی جاده به صورت روابط غیرخطی (۱) الی (۵) تعریف می‌شود.

$$\dot{\zeta}_d = v_l - v_f \quad (1)$$

$$\dot{v}_f = a_f \quad (2)$$

$$\dot{a}_f = g_f(v_f, a_f) + h_f(v_f)\delta_f \quad (3)$$

$$g_f(v_f, a_f) = -\frac{2K_{ad}}{m} - \frac{1}{\tau_f} \left[a_f + \frac{K_{ad}}{m_f} v_f^2 + \frac{K_{md}}{m_f} \right] \quad (4)$$

$$h_f(v_f) = \frac{1}{m_f \tau_f} \quad (5)$$

۳. خطی‌سازی سیستم

یکی از روش‌های رایج برای کنترل سیستم‌های غیرخطی استفاده از "بازخورد خطی" است که شامل یک نوع دگرگونی از معادلات سیستم غیرخطی به یک دسته معادلات سیستم خطی توسط یک تغییر متغیر و یک ورودی کنترلی مناسب است. بازخورد خطی برای یک سیستم، می‌تواند به صورت رابطه (۶) در نظر گرفته شود.

$$\dot{x} = f(x) + g(x)\delta \quad (6)$$

که در رابطه (۶)، δ برداری از ورودی‌ها می‌باشد و هدف توسعه یک ورودی کنترلی به صورت معادله است. در این مقاله قانون کنترلی بازخورد خطی می‌تواند به صورت رابطه (۷) تعریف گردد:

$$\delta_f = m_f \mu_{fc} + K_{ad} v_f^2 + K_{md} + 2\tau_f K_{ad} v_f a_f \quad (7)$$

که در رابطه (۷)، μ_{fc} سیگنال ورودی است بنابراین با توجه به روابط (۱) الی (۳) و استفاده از بازخورد خطی رابطه (۳) به صورت رابطه (۸) تبدیل می‌گردد.

$$\dot{a}_f = \frac{1}{\tau_f} (\mu_{fc} - a_f) \quad (8)$$

در رابطه (۸)، τ_f ثابت زمانی موتور و اغتشاشات داخلی را مدل کرده است، بنابراین می‌توان سیستم را به صورت روابط (۹) و (۱۰) به فرم استاندارد یک سیستم خطی توصیف و بیان کرد.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (9)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_f} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ \tau_f \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T, D = [0] \quad (10)$$

حالت‌های سیستم x_1 بیانگر خطای فاصله، x_2 بیانگر سرعت نسبی و x_3 بیانگر شتاب اتومبیل پیرو می‌باشند. در این مقاله فاصله مدنظر ما (ζ_d) بر این پایه است که به ازای سرعت هر ۱۰ مایل بر ساعت، باید به اندازه یک طول اتومبیل، بین دو اتومبیل فاصله باشد.

¹ Feedback linearization

۴. بررسی کنترل پذیری^۱ و رویت پذیری^۲ سیستم:

قبل از کنترل یک سیستم، باید از کنترل پذیری بودن و رویت پذیری بودن آن اطمینان حاصل کرد. برای بررسی کنترل پذیری، ماتریس کنترل پذیری $cont$ را مطابق رابطه (۱۱) تعریف می کنیم.

$$cont = [B | AB | A^2B | \dots | A^{n-1}B] \quad (11)$$

اگر ماتریس $cont$ ، مرتبه کامل^۳ باشد، آنگاه سیستم کنترل پذیر کامل است. [۷]
برای بررسی رویت پذیری نیز ماتریس رویت پذیری obs را مطابق رابطه (۱۲) تعریف می کنیم.

$$obs = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

اگر ماتریس obs ، مرتبه کامل باشد، آنگاه سیستم رویت پذیر کامل است [۷]. ماتریس های $cont$ و obs در این مقاله، مطابق رابطه (۱۳) به دست آمده اند.

$$cont = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.0500 \\ 0 & 0.0500 & -0.0250 \\ 0.0500 & -0.0250 & 0.0125 \end{bmatrix}, obs = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

مرتبه ماتریس های کنترل پذیری و رویت پذیری در این مقاله برابر با ۳ است. یعنی سیستم، کنترل پذیر کامل و رویت پذیر کامل است. با توجه به اینکه سیستم ما کنترل پذیر است، در نتیجه ما می توانیم مکان قطب های سیستم را در هر جایی که دلخواه ما باشد تغییر دهیم.

۵. طراحی کنترلر

روش های مختلفی برای طراحی کنترلر وجود دارد که هر کدام دارای ویژگی های مختلف و مزایای متفاوتی است. ما در این مقاله از فیدبک حالت که توسط روش غیربهمینه جایابی قطب و روش بهمینه LQR که مقدار تابع هزینه را نیز حداقل می کند، بهره گرفته ایم.

۵.۱. روش جایابی قطب^۴

این روش یکی از روش های کنترل فیدبک حالت است. در سیستم هایی که قطب ها در سمت راست محور موهومی قرار دارند و ناپایدار هستند، این روش با جابه جایی قطب ها در محل مطلوب، باعث پایدار شدن سیستم حلقه بسته می شود. روش های مختلفی از جمله روش بس و گیورا^۵ برای جایابی قطب وجود دارد. برای پیاده سازی روش جایابی قطب در حالت کلی، ابتدا معادلات حالت (۱۴) را در نظر می گیریم.

¹ Controllability

² Observability

³ Full Rank

⁴ Pole Placement

⁵ Bass and Gura Method

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A(t)x + B(t)u \\ y &= C(t)x + D(t)u\end{aligned}\quad (14)$$

در روش های فیدبک حالت، مطابق رابطه (۱۵)، مقدار ورودی سیستم، تابعی از حالت های سیستم است.

$$u = -K(t)x \quad (15)$$

معادله مشخصه سیستم (۱۴) را به صورت رابطه (۱۶) در نظر می گیریم.

$$p(s) = s^n + p_1 s^{n-1} + \dots + p_{n-1} s + p_n \quad (16)$$

برای اینکه قطب های ناپایدار سیستم به محل مطلوب منتقل شوند، بایستی معادله مشخصه سیستم به شکل رابطه (۱۷) تبدیل شود.

$$q(s) = s^n + q_1 s^{n-1} + \dots + q_{n-1} s + q_n \quad (17)$$

انتقال قطب ها به محل مطلوب، توسط ضریب فیدبک k به دست می آید [۵].

در نرم افزار MATLAB برای جایابی قطب ها می توان مطابق رابطه (۱۸) از دستور place استفاده کرد.

$$K = \text{place}(A, B, p) \quad (18)$$

که A و B ماتریس های فضای حالت سیستم، p قطب های مطلوب سیستم و k ضریب کنترلی فیدبک می باشند. در این مقاله، قطب های سیستم مطابق رابطه (۱۹)، قطب های مطلوب مطابق رابطه (۲۰) و ضریب k مطابق رابطه (۲۱) به دست آمده است.

$$p_1 = 0, p_2 = 0, p_3 = -0.5 \quad (19)$$

$$p_1 = -1.5 + 2i, p_2 = -1.5 - 2i, p_3 = -2 \quad (20)$$

$$K = [-250, 245, 90] \quad (21)$$

در بخش (۳) تاثیر کنترلر جایابی قطب، بررسی شده است.

۲.۲.۵ LQR روش

روش LQR نیز از روش های کنترل فیدبک حالت است و به دلیل در نظر گرفتن تابع هزینه و بهینه سازی آن و مقاوم پذیری^۱ مناسب از روش های کنترل بهینه نیز به حساب می آید [۶].

معادلات فضای حالت (۲۲) را در نظر می گیریم .

$$\dot{x} = A(t)x + B(t)u \quad (22)$$

شکل کلی تابع هزینه مطابق رابطه (۲۳) است. ماتریس های Q ، R ، QT و ماتریس های وزن دهی می باشند.

$$J = \int_{t_0}^T (x^T Q x + u^T R u) dt + x^T(T) Q_T x(T) \quad (23)$$

در این روش مقدار ورودی در هر لحظه، برابر ضریبی از مقدار حالت های سیستم است. این ضریب کنترلی را با K نمایش می دهند و مقدار آن از رابطه (۲۴) به دست می آید.

^۱ Robustness

$$u^*(x, t) = x - \underbrace{R^{-1} B^T Q_T}_{K(t)} = -K(t)x \quad (24)$$

در این مقاله، تابع هزینه به صورت رابطه (۲۵) تعریف شده است.

$$J = \int_0^\infty x(t)Qx(t) + \mu_{fc}^2 \quad (25)$$

در رابطه (۲۵) از یک سیگنال کنترلی به نام μ_{fc} استفاده شده است. معادلات ریکارتی تولید شده برای بردار P به صورت رابطه (۲۶) محاسبه می گردد.

$$A^T P + PA - PBB^T P + Q = 0 \quad (26)$$

در این مقاله شرایط اولیه سیستم به صورت $[x_1, x_2, x_3] = [20, 2.4, 0]$ در نظر گرفته شده است. ماتریس های وزندهی را مطابق رابطه (۲۷) در نظر می گیریم.

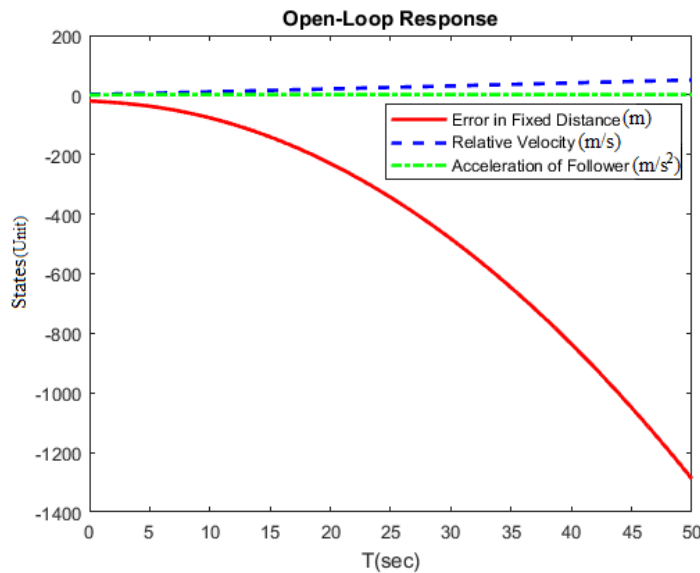
$$Q = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 10m \end{bmatrix}, R = 1, Q_T = 0 \quad (27)$$

در رابطه (۲۷) متغیر m ماتریس وزندهی Q را مشخص می کند و این ماتریس نیمه معین مثبت است. پارامتر m با توجه به میزان اهمیت و نحوه وزندهی به هر کدام از حالت ها بدست می آید. در این مقاله، ضریب K در روش LQR مطابق رابطه (۲۸) به دست آمده است.

$$K = [-0.7071 \quad 5.0236 \quad 7.4912] \quad (28)$$

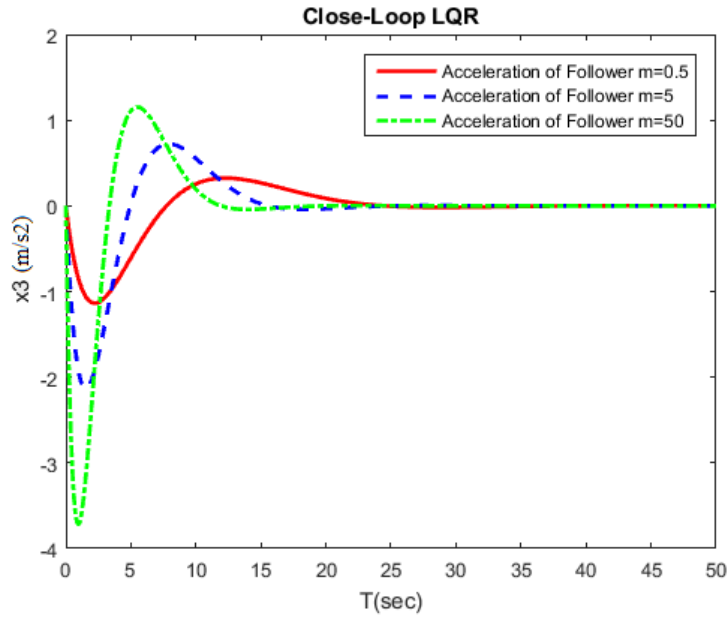
۶. وضعیت حالت ها در حضور و عدم حضور کنترلر و نمایش تابع هزینه

در شکل ۴ پاسخ سیستم بدون حضور کنترلر نشان داده شده است.



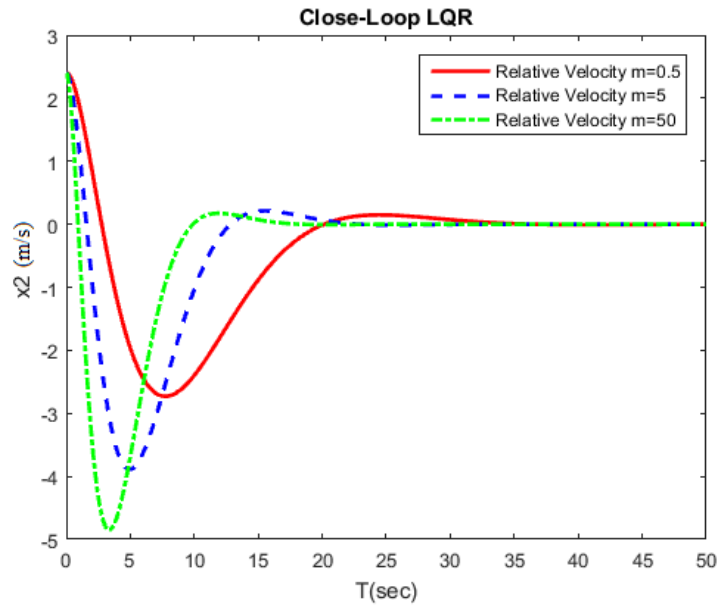
شکل ۴ - وضعیت حالت های سیستم بدون حضور کنترلر

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که حالت‌های سیستم، بدون حضور کنترلر، ناپایدار هستند. مقدار خطای فاصله بین اتومبیل راهنما و اتومبیل پیرو، به شدت کاهش پیدا کرده است و این به معنی برخورد دو اتومبیل با یکدیگر است. یکی از وظایف کنترلر، تنظیم و کنترل خطای فاصله است.

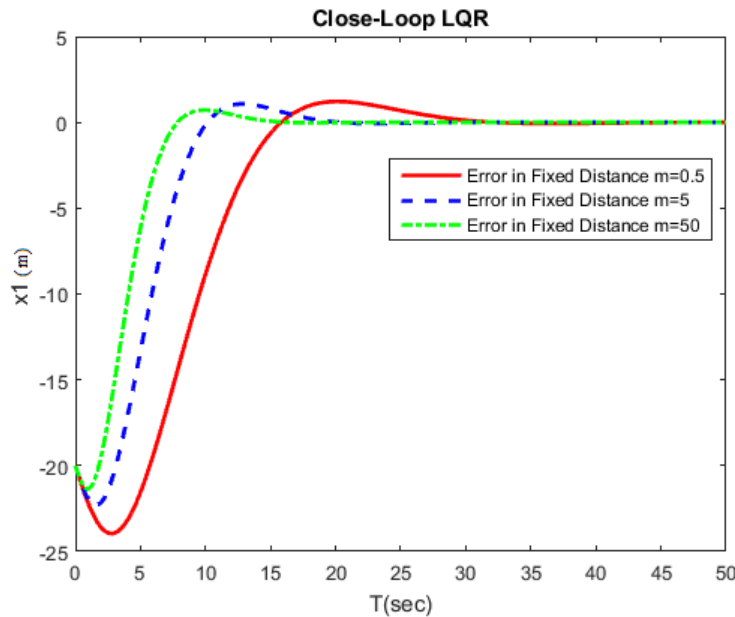


شکل ۵- وضعیت حالت سوم (شتاب) با m متفاوت

همانطور که در بخش (۲.۵) توضیح داده شد، انتخاب m در ماتریس Q بسیار اهمیت دارد. در این مقاله وضعیت حالت‌های سیستم در حضور کنترلر LQR را برای مقدارهای ۰.۵ و ۵ و ۵۰ برای m ، مقایسه کرده‌ایم. هر انتخاب مزیت‌ها و معایبی دارد که در جدول ۱ مقایسه شده‌اند. در شکل‌های ۵، ۶ و ۷ حالت‌های سیستم را با مقادیر مختلف m مشاهده می‌کنید.



شکل ۶- وضعیت حالت دوم (سرعت نسبی) با m متفاوت

شکل ۷ - وضعیت حالت اول (خطای فاصله) با m متفاوت

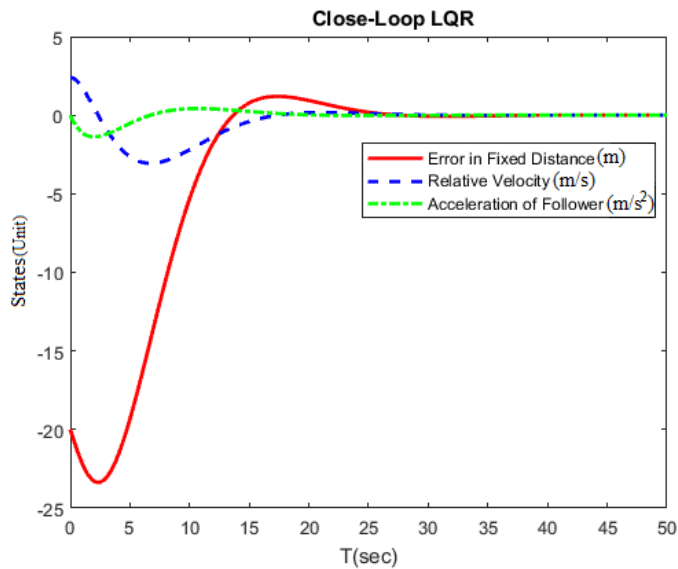
در شکل ۵، مقدار شتاب اتومبیل پیرو، در شکل ۶ مقدار سرعت نسبی و در شکل ۷ خطای فاصله برای مقادیر مختلف m ، در طول ۵۰ ثانیه رسم شده‌اند. با توجه به شکل‌های ذکر شده، وقتی مقدار m برابر ۰.۵ باشد مقدار فرجهش^۱ و فرجهش^۲ افزایش و زمان نشست کاهش می‌یابد وقتی مقدار m برابر با ۵۰ باشد، مقدار فرجهش و فرجهش کاهش و زمان نشست افزایش می‌یابد. مقدار فرجهش و فرجهش را می‌توان به صورت تغییر ناگهانی سرعت و شتاب تفسیر کرد که هر چقدر مقدار آن کمتر باشد، مسافری در آرامش بیشتری خواهند بود. همانطور که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، در کنترل اتومبیل های شخصی، آرامش مسافری از اهمیت بالایی برخوردار است. به همین دلیل انتخاب $m=0.5$ برای این مساله بهتر است. جدول ۲ مقادیر فرجهش، فرجهش و زمان نشست را برای m های مختلف، نشان می‌دهد.

جدول ۲ - مقایسه حالت سوم سیستم با m های مختلف

مقادیر m	فرجهش	فرجهش	زمان نشست
$m=0.5$	0.32	-1.13	30
$m=5$	0.72	-2.13	18
$m=50$	5.47	-3.7	14

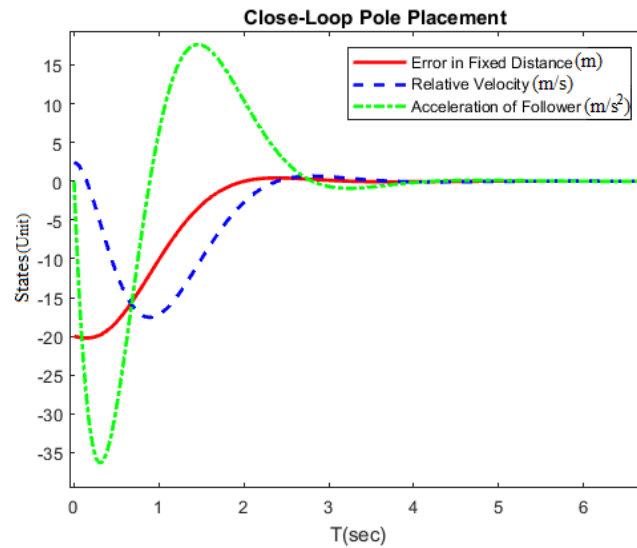
در شکل ۸ پاسخ سیستم را در حضور کنترلر LQR با $m=0.5$ مشاهده می‌کنیم. مقدار فرجهش خطای فاصله، حداکثر ۱ متر و زمان نشست آن ۲۵ ثانیه است. سرعت نسبی نیز فرجهش و فرجهش مناسبی داشته و این به معنی نرم بودن حرکت اتومبیل است و از تغییر ناگهانی سرعت جلوگیری شده است که این امر، باعث آرامش مسافری می‌شود. به همین ترتیب میزان شتاب اتومبیل پیرو نیز فرجهش و فرجهش مناسبی داشته و این نشان دهنده طراحی مناسب کنترلر است.

¹ overshoot
² undershoot



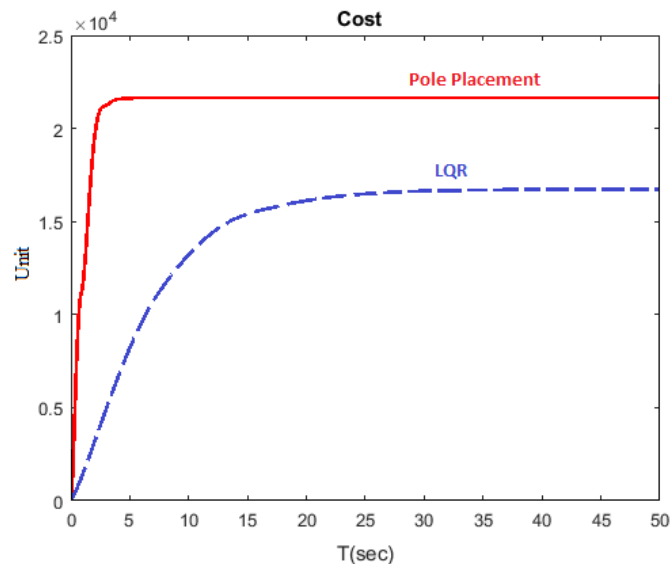
شکل ۸- وضعیت حالت ها با روش LQR

در شکل ۹ پاسخ سیستم در حضور کنترلر جایابی قطب را مشاهده می کنیم. مطابق شکل ۹، خطای فاصله بین اتومبیل ها به خوبی کنترل و تنظیم شده است، اما میزان سرعت نسبی و شتاب اتومبیل پیرو، فراجاهش و فروجهش زیادی داشته که به معنی تغییر ناگهانی سرعت و شتاب اتومبیل است که باعث ناراحتی مسافری می شود. به همین دلیل روش کنترلی جایابی قطب، برای این مساله مناسب نیست.



شکل ۹- وضعیت حالت های سیستم با روش جایابی قطب

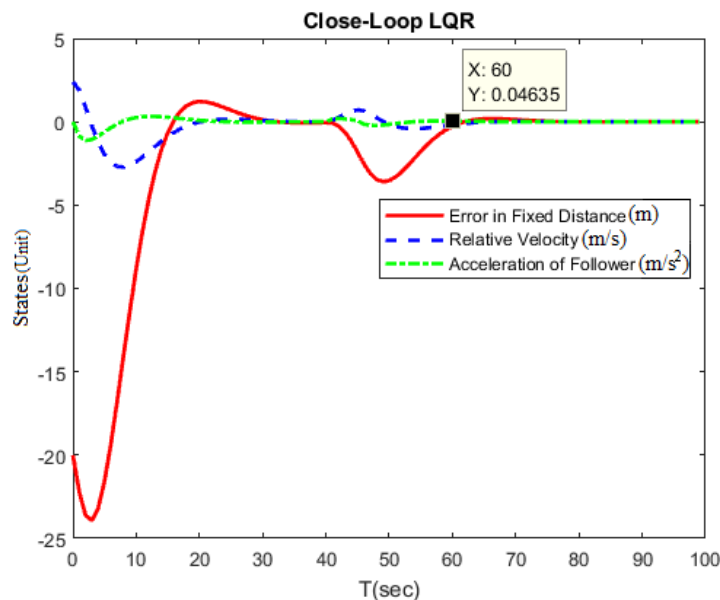
در شکل ۱۰ تابع هزینه برای دو روش LQR و جایابی قطب رسم شده اند. همانطور که مشاهده می شود مقدار تابع هزینه با روش LQR مقدار کمتری نسبت به روش جایابی قطب دارد و همین مسئله، یکی از دلایل برتری و بهینه تر بودن کنترلر LQR است.



شکل ۱۰- تابع هزینه در روش LQR و جایابی قطب

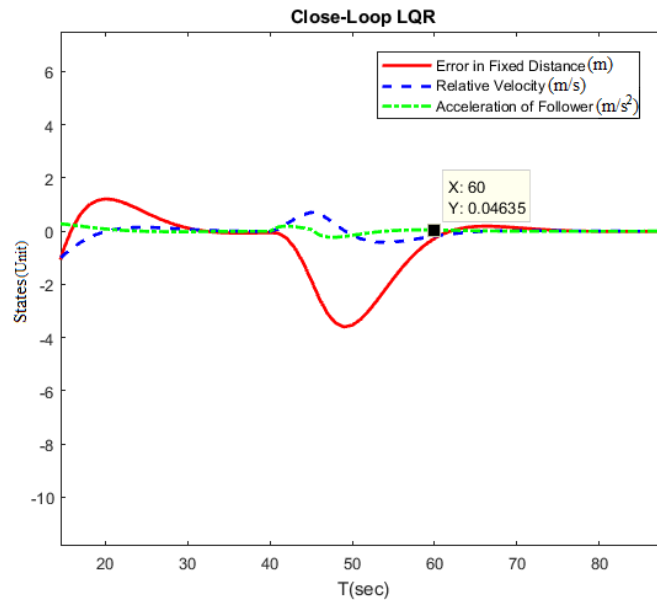
۷. تست کنترلر و سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاشات

در رانندگی، اغتشاشات به دو دسته اغتشاشات ذاتی و غیر ذاتی اتومبیل تقسیم می‌شود. عواملی مانند لرزش‌های پیایی اتومبیل به دلیل نقص در موتور اتومبیل، کاهش یا افزایش شتاب اتومبیل و... از جمله اغتشاشات ذاتی اتومبیل و عواملی مانند گاز یا ترمز ناگهانی راننده، تغییر ناگهانی مسیر و... از جمله اغتشاشات غیر ذاتی هستند. برای تست کنترلر و عملکرد حلقه بسته سیستم، ابتدا اغتشاشی معادل با ۵ متر ترمز ناگهانی اتومبیل راهنما و سپس اغتشاشی معادل با ۲ متر ترمز و گاز ناگهانی اتومبیل راهنما، به سیستم وارد می‌شود. در شکل ۱۱، عملکرد سیستم با حضور ترمز ناگهانی در لحظه ۴۰ ثانیه نشان داده شده است.



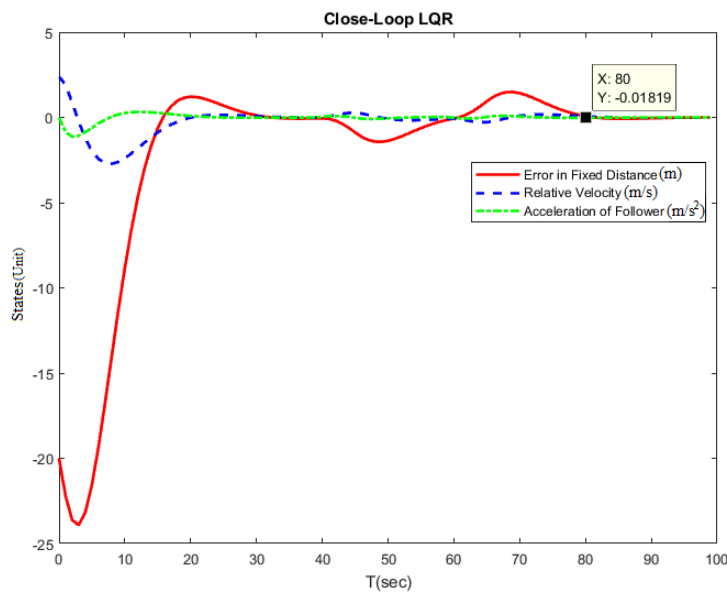
شکل ۱۱- عملکرد سیستم با حضور اغتشاش از نوع ترمز ناگهانی در لحظه ۴۰ ثانیه

همانطور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، سیستم توانسته بعد از گذشت ۳۰ ثانیه حالت پایدار خود را به دست آورد اما با اضافه شدن اغتشاش در لحظه ۴۰ ثانیه، سیستم حالت پایدار خود را از دست داده و سپس توانسته عملکرد مطلوب خود را در لحظه ۶۰ ثانیه به دست آورد. شکل ۱۲ نیز همین نتایج را با بزرگنمایی نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ - بزرگنمایی در شکل ۱۱

برای بررسی بیشتر، اغتشاش دوم را نیز به سیستم اعمال می‌کنیم. در شکل ۱۳، عملکرد سیستم حلقه بسته در حضور اغتشاش از نوع ترمز و گاز ناگهانی در لحظه ۴۰ ثانیه و ۶۰ ثانیه، نشان داده شده است.



شکل ۱۳ - عملکرد سیستم با حضور اغتشاش از نوع ترمز و گاز ناگهانی در لحظه ۴۰ و ۶۰ ثانیه

در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که سیستم حلقه بسته توانسته است با اضافه شدن دو نوع اغتشاش در لحظه ۴۰ و ۶۰ ثانیه، در نهایت در لحظه ۸۰ ثانیه به عملکرد مطلوب خود برسد.

۸. نتیجه‌گیری

در این مقاله بعد از بررسی روش کنترل بهینه LQR و جایابی قطب، کنترلرها طراحی شده و به سیستم اعمال شده‌اند. در نهایت با بررسی رفتار سیستم در حضور کنترلرها و با توجه به شکل ۱۰، می‌توان نتیجه گرفت در مورد این سیستم، کنترلر LQR به دلیل بهینه‌سازی تابع هزینه و انتخاب ورودی بهینه، نسبت به کنترلر جایابی قطب که کنترلری غیربهینه است، برتری بیشتری دارد.

و با هزینه کمتر و شرایط ایمن تر، پاسخ سیستم به پاسخ مطلوب رسیده است. با توجه به بخش ۶ نیز می توان نتیجه گرفت که در هر مساله، تابع هزینه و ضرایب آن به طریقی مناسب انتخاب شوند. با توجه به جدول ۲، در این مساله با انتخاب مقدار $m=0.5$ بهترین نتیجه حاصل شده است. همچنین نتایج نشان داده شده در بخش ۷، بیانگر این نکته است که کنترلر LQR طراحی شده، در برابر اغتشاشات مقاوم بوده و با اعمال ضریب کنترلی K ، که مطابق رابطه (۲۸) به دست آمده است، عملکرد سیستم حلقه بسته را به عملکرد مطلوب رسانده است و در مقابل، روش کنترلی جایابی قطب برای این مساله مناسب نبوده و مقادیر فراجهبش و فروجهش حالت های سیستم از حد مجاز بیشتر بوده است.

۱۲. مراجع

1. G. Han, W. Fu, W. Wang, and Z. Wu, "The Lateral Tracking Control for the Intelligent Vehicle Based on Adaptive PID Neural Network," *Sensors*, vol. 17, p. 1244, 2017.
2. K. M. Junaid, W. Shuning, A. Pervaiz, and R. N. Iqbal, "Autonomous cruise control with a minimal order Quasi-linear controller," in *Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2006 IEEE*, 2006, pp. 3088-3093.
3. K. M. Junaid, W. Shuning, K. Usman, and R. Naveed, "LQR autonomous longitudinal cruise control with a minimum order state observer," in *Proc. Eighth IASTED Int. Conf., Cambridge, USA, 2005*.
4. L. Heilig, R. R. Negenborn, and S. Voß, "Cloud-based intelligent transportation systems using model predictive control," in *International Conference on Computational Logistics, 2015*, pp. 464-477.
5. K. J. Aström and R. M. Murray, *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*: Princeton University press, 2010.
6. E. Lavretsky and K. A. Wise, "Robust adaptive control," in *Robust and Adaptive Control*, ed: Springer, 2013, pp. 317-353.
7. E. Yip and R. Sincovec, "Solvability, controllability, and observability of continuous descriptor systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 26, pp. 702-707, 1981.