

کنترل پلتون حمل و نقل خودروهای سنگین بین شهری در بستر اینترنت اشیا

حجت حسامی پور^۱ ایمان شریفی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

hojathesamipour@aut.ac.ir

۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی امیرکبیر- تهران- ایران

Imansharifi@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، مسئله پلتون خودروهای سنگین بین شهری در بستر اینترنت اشیا مورد مطالعه و بررسی قرار می گیرد. پلتون در خودروها به معنای آن است که خودروها در گروهایی به رهبری یکی از خودروهای گروه، در کنار یکدیگر و با نظم و ترتیب و جهت گیری مشخص حرکت کنند. پلتون خودروهای سنگین در مسائلی مانند کاهش ترافیک و افزایش ظرفیت جاده ها، کاهش تصادفات و امنیت بیشتر جاده ها و کاهش آلودگی بسیار مؤثر است. در پلتون خودروها در بستر اینترنت اشیا به یکدیگر متصل شده و موقعیت خود و سایر اطلاعات لازم برای کنترل پلتون را به اشتراک می گذارند؛ که به این نوع ارتباط میان خودروها ارتباط V2V گفته می شود. همچنین وقتی خودروها از طریق اینترنت اشیا کنترل می شوند رانندگان می توانند اطلاعاتی مانند وضعیت ترافیک جاده ها و علائم راهنمایی و رانندگی موجود در مسیر را دریافت کنند، که به این نوع ارتباط V2I گفته می شود. اما با توجه به ارتباط بی سیم خودروها در این بستر، امکان حمله سایبری به خودروها و مختل کردند پلتون وجود دارد. لذا باید کنترل کننده در مقابل حملات سایبری مقاوم باشد. چالش دیگر در پلتون وجود موانع از پیش تعیین نشده در مقابل یک یا چند خودرو می باشد که باید پلتون به نحوی طراحی شود تا علاوه بر جلوگیری از برخورد خودرو با مانع، رفتار رهبر گروه نیز دنبال شود. در این پروژه یک کنترل کننده تاب آور جدید طراحی شده است به طوری که ضمن جلوگیری از حملات سایبری، از برخورد خودروها با موانع متحرک و ثابت نیز جلوگیری می کند. در انتها تئوری پیشنهاد شده برای سیستم پلتون، بر روی دو ربات حقیقی سه چرخ غیر هولونومیک پیاده سازی می شود. همچنین تعدادی خودروی مجازی نیز طراحی شده است و به صورت نرم افزار در حلقه در سیستم پلتون پیاده سازی شده قرار می گیرند. نتایج پیاده سازی مزیت روش پیشنهاد شده را نشان می دهد.

واژه های کلیدی: کنترل پلتون خودروها، خودروهای متصل به هم، حملات سایبری در خودروها، کنترل کننده اجماع در خودروها، جلوگیری از برخورد خودروها با موانع در پلتون

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaee.19.3.227

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۱/۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۳/۲۹

نام نویسنده ی مسئول: دکتر ایمان شریفی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران- تهران- خیابان حافظ - پلاک ۴۲۴ - دانشگاه صنعتی امیرکبیر - دانشکده ی مهندسی برق

۱- مقدمه

سایبری و ... را به درستی انجام دهند. اما در دهه اخیر با رشد فناوری، رانندگی بسیار راحت‌تر شده و امکان پیاده‌سازی سیستم پلتون فراهم شده است. به عنوان مثال به کمک سیستم کنترل تطبیقی کروژ^۲ می‌توان از سنسورهایی که فاصله بین خودروها را تشخیص می‌دهند اطلاعات را دریافت کرده و سرعت و فاصله با خودرو جلویی را به صورت خودکار تنظیم کرد. همچنین خودروهای پیشرفته بدون راننده توسعه یافته‌اند و در برخی از کشورها مجاز به رانندگی می‌باشند. مقالات مختلفی در زمینه کنترل خودروها ارائه شده است به عنوان مثال در [۶] پایداری سیستم CACC^۳ در شرایطی که سیستم ارتباطی به درستی کار نمی‌کند مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی آن نشان می‌دهد که فرکانس ارسال اطلاعات و نرخ از دست دادن اطلاعات تأثیر قابل توجهی بر عملکرد کنترل‌کننده CACC دارد و فرکانس ارسال پایین یا نرخ بالای از دست دادن اطلاعات در ارتباط V2V می‌تواند کنترل‌کننده CACC را ناپایدار کند؛ این مسئله و سایر عوامل موجب شده است تا روش‌های سنتی که واحد محاسبات، ارتباطات و پرونده‌های فیزیکی هر خودرو به طور مجزا و با فرض اینکه دیگر اجزا رفتار قطعی داشته باشند، برای سامانه‌های VCPSS^۴ مناسب نمی‌باشد. برای حل این مسئله یک تحقیق در [۷] انجام شده است که در آن یک سیستم CVSS^۵ طراحی شده است. همچنین در [۸] مسئله CACC با در نظر گرفتن تأخیر متغیر با زمان در ارتباطات مخابراتی و همچنین تأخیر در عملگرها بررسی شده و شرایط لازم برای پایداری پلتون ارائه شده است.

همچنین در سال‌های اخیر کنترل‌کننده‌های مختلفی از جمله کنترل‌کننده پلتون با توجه به حضور عیب متغیر با زمان در عملگرها [۹] و کنترل‌کننده H_∞ برای کنترل پلتون [۱۰] ارائه شده است. در پلتون، علاوه بر چالش‌های فنی، چالش‌های اجتماعی نیز وجود دارد که به عنوان مثال در [۱۱] به مسئله سیاست‌گذاری و لزوم کنترل انسانی بر روی سیستم‌های خودران پلتون (MHC^۶) پرداخته است. در [۱۲] یک ساختار برای سیستم پلتون آورده شده است. واحد خودرو از دو بخش تشکیل شده است: مدل سیستم مبتنی بر پلتون متحرک/ کنترل که دینامیک خودرو را تحت الگو پلتون تنظیم می‌کند و بخش مدل شبکه / ارتباطات که شامل توپولوژی ارتباطات، لایه‌های شبکه و ... می‌شود. پلتون با به‌کارگیری فناوری ارتباطات بی‌سیم، سیستم‌هایی را که برای کنترل خودروهای تکی پیاده‌سازی شده‌اند را بسیار ساده‌تر می‌کند و باعث افزایش هوشمندی سامانه‌های حمل‌ونقل می‌شود.

یکی از چالش‌های پلتون، با توجه به ارتباطات بی‌سیم میان خودروها، احتمال حمله سایبری به یک یا چند خودرو می‌باشد که این امر می‌تواند الگوی حرکتی تمامی اعضا را مختل کند. در [۱۳] حملات سایبری که در لایه مخابراتی سیستم پلتون اتفاق می‌افتد را بررسی کرده است و همچنین [۱۴] الگوریتم‌هایی برای تشخیص حمله

امروزه با رشد اقتصادی کشورها، نیاز به حمل‌ونقل بین‌شهری بیشتر شده است و بیشتر حمل‌ونقل‌ها از طریق جاده‌ها صورت می‌گیرد که این موضوع باعث افزایش تعداد خودروهای سنگین شده است. در سال ۲۰۱۴ بیش از یک میلیارد خودرو در جهان در حال فعالیت بوده است که تعداد آن‌ها در ۱۰ تا ۲۰ سال آینده دو برابر خواهد شد و این افزایش شدید تعداد خودروها مسائلی مهمی چون افزایش ترافیک، افزایش تصادفات جاده‌ای، اتلاف بیش‌ازحد انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و ایجاد آلودگی به وجود خواهد آورد. به عنوان مثال در ایالات متحده آمریکا ازدحام ترافیک علاوه بر آلودگی بسیاری از شهرها، هزینه‌ای بالغ بر صد میلیون دلار به دلیل اتلاف انرژی و وقت بر دوش رانندگان می‌گذارد [۱-۳]. همچنین در بسیاری از مناطق به دلیل محدود بودن فضا، امکان توسعه راه‌ها و افزایش جاده‌ها برای حل مشکل ترافیک وجود ندارد. یکی از رویکردهای مؤثر برای حل این مشکل، تغییر الگوی رانندگی می‌باشد؛ بدین‌صورت که به جای کنترل حرکت هر خودرو به‌طور مجزا، خودروها در گروه‌هایی با نظم و ترتیب در کنار یکدیگر حرکت کنند. به این نظم و ترتیب خودروهای سنگین که از طریق ارتباط آن‌ها با یکدیگر و پیروی از یک خودرو به عنوان رهبر گروه انجام می‌شود، پلتون خودروهای سنگین^۱ گفته می‌شود. این نظم و فاصله معین در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): پلتون در خودروهای سنگین

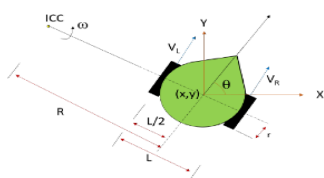
از جمله مزیت‌های الگو رانندگی پلتون می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: (۱) کاهش فاصله بین خودروها و در نتیجه افزایش ظرفیت جاده‌ها و کاهش ازدحام ترافیک (۲) کاهش اتلاف انرژی (به دلیل فرم خاص قرارگیری خودروها در کنار یکدیگر و کاهش اثر نیروی مقاومت هوا [۴]) و کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای (۳) امنیت و راحتی بیشتر رانندگان (۴) کاهش زمان توقف در حین رانندگی: به طور مثال در [۵] با ارائه مدلی برای پلتون، سرعت خودروها را بهینه کرده و زمان توقف خودروها را نیز کاهش داده است. در پلتون لزومی ندارد که همه خودروها یک مقصد و یک مسیر مشخص داشته باشند، چراکه هر خودرو می‌تواند در طولی از مسیر خود در یک گروه پلتون باشد، سپس از گروه جدا شده و مسیر خود را تغییر داده و به گروه پلتون دیگری بپیوندد.

پلتون یک سیستم پیچیده است و خودروها باید برای کنترل و مدیریت پلتون وظایفی چون شکل‌گیری و ایجاد نظم در گروه، ادغام شدن با سایر گروه‌ها، جدا شدن از یک گروه، امنیت در مقابل حملات

در این ربات دو چرخ عقب توسط دو موتور DC به صورت مجزا کنترل می‌شود و تک چرخ جلو ربات هرز گرد می‌باشد. همچنین از یک برد آردوینو میکرو پرو جهت خواندن اطلاعات انکودر و یک برد رزبری پای مدل ۳ بی پلاس جهت انجام محاسبات کنترلی و از سنسورهای انکدر افزایشی جهت کنترل سرعت موتورها و از قطب‌نمای HMC ۵۸۸۳ [۱۵] جهت به دست آوردن زاویه ربات استفاده شده است. ساختار کلی ربات بدین صورت می‌باشد که اطلاعات انکودرها توسط برد آردوینو خوانده شده و به همراه اطلاعات سنسور قطب‌نما از طریق پورت سریال به رزبری پای ارسال می‌شود. رزبری پای با ارتباط وای‌فای به سرور متصل شده و با توجه به کد کنترلی که بر روی رزبری در حال اجرا می‌باشد و اطلاعات سرور، سرعت مطلوب دو موتور را محاسبه کرده و در نهایت با تولید موج PWM ولتاژ متوسطی را از طریق درایورها به دو موتور ربات اعمال می‌کند؛ پس از آن موتورها با سرعت مطلوب شروع به چرخیدن کرده و ربات را به مکان مورد نظر خواهند برد.

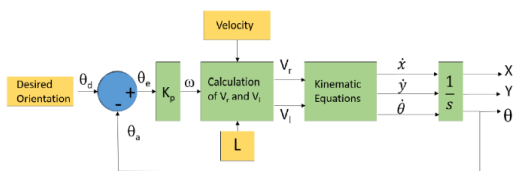
ب: مدل‌سازی ربات

به این نوع از ربات‌ها، ربات‌های تفاضلی گفته می‌شود، که در آن‌ها کنترل ربات و حرکت دادن آن به سمت موقعیت مطلوب تنها با تنظیم سرعت موتور چپ و راست صورت می‌گیرد. پارامترهای ربات در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): مدل ربات سه‌چرخ

در این شکل V_R سرعت موتور راست، V_L سرعت موتور چپ، d فاصله بین مرکز دو چرخ، θ زاویه ربات نسبت به محور مختصات در نظر گرفته شده و r شعاع چرخ‌ها می‌باشد. برای مدل‌سازی ربات فرض می‌شود که: (۱) حرکت ربات در بازه‌ها زمانی کوتاه اتفاق می‌افتد که در هر یک از این بازه‌ها سرعت موتور چپ و راست ثابت هستند (۲) چرخ‌های ربات بر روی سطح زمین سر نمی‌خورد و سطح زمینی که ربات بر روی آن حرکت می‌کند صاف و بدون ناهمواری می‌باشد. بلوک دیاگرام کنترل سینماتیک ربات در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): بلوک دیاگرام کنترل سینماتیک ربات

همانطور که در شکل (۳) مشخص است، برای کنترل ربات میزان زاویه ربات از زاویه مطلوب کم شده و سیگنال خطای بدست آمده به کمک معادلات سینماتیک به سرعت موتور چپ و راست تبدیل شده و ربات

سایبری ارائه کرده است. در این مقالات الگوریتم تشخیص حمله سایبری جدای از کنترل‌کننده پلتون و کنترل‌کننده پلتون مجزا طراحی شده است.

در این پروژه برای کنترل پلتون خودروها، از تئوری‌های کنترل در سیستم‌های چندعاملی و کنترل‌کننده اجماع کمک گرفته شده و هر خودرو یک عامل در نظر گرفته شده است. همچنین برای مقابله با حملات سایبری، از الگوریتم کنترل تاب‌آور بر پایه آبرو کمک گرفته می‌شود که این الگوریتم به همراه کنترل‌کننده اجماع طراحی شده و جدای از آن نمی‌باشد. برای جلوگیری از برخورد ربات‌ها با موانع از پیش تعیین نشده، از کنترل‌کننده دوری از مانع بر اساس ایده میدان پتانسیل مصنوعی کمک گرفته شده است. توجه شود که هر سه هدف کنترلی بیان شده در قالب یک کنترل‌کننده ارائه شده است. همچنین برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده پیشنهادی، از دو خودرو Non-holonomic کمک گرفته شده است. در پیاده‌سازی عملی به کمک روش نرم‌افزار در حلقه و به صورت real-time دو ربات مجازی نیز به مجموعه ربات‌های واقعی اضافه شده است که یکی از آنها به عنوان ربات بدرفتار و دیگر به عنوان رهبر گروه عمل می‌کند.

مطالب این مقاله در بخش‌های زیر نگارش شده است: در بخش دوم مختصری از قسمت‌های مختلف ربات و نحوه عملکرد آن توضیح داده شده و سپس مدل سینماتیکی ربات آورده شده است. در بخش سوم طراحی سه بخش اصلی کنترل‌کننده یعنی کنترل‌کننده مربوط به دنبال کردن رهبر گروه، ایزوله کردن ربات مورد حمله و دوری ربات‌ها از مانع آورده شده است و در انتهای این بخش کنترل‌کننده نهایی طراحی شده است. در بخش چهارم نحوه پیاده‌سازی پروژه در آزمایش عملی آورده شده و در ادامه نتایج شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی پلتون آورده شده است. در بخش آخر به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از این طرح پرداخته و سپس پیشنهادهایی درباره‌ی کارهای آینده در این حوزه ارائه شده است.

۲- نحوه عملکرد ربات‌ها و مدل‌سازی ربات

الف: نحوه عملکرد ربات

در این پروژه، برای پیاده‌سازی پلتون در آزمایش عملی از دو ربات سه‌چرخ استفاده شده است که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل (۲): ربات سه‌چرخ جهت پیاده‌سازی پلتون در آزمایش عملی

۳- طراحی کنترل کننده پلتون

در این بخش، قسمت مهمی از پروژه یعنی شیوه کنترل ربات‌ها توضیح داده خواهد شد. همانطور که قبلاً بیان شد در این مقاله، هدف رسیدن به سه هدف کنترلی الف) حفظ الگوی پلتون ب) ایزوله کردن خودروها از خودرویی که مورد حمله سایبری قرار گرفته است ج) جلوگیری از برخورد ربات‌ها با مانع می‌باشد. در این فصل ابتدا الگوریتم‌ها و مباحث کنترلی استفاده شده به صورت مجزا توضیح داده می‌شود و در انتها با ترکیب این مباحث کنترلر نهایی طراحی خواهد شد.

۳-۱- استفاده از مفهوم اجماع در کنترل پلتون

سیستم‌های چندعاملی به بررسی رفتار عامل‌ها در یک گروهی که از تعداد زیادی عضو تشکیل شده است و همگی به دنبال هدفی واحد می‌باشند می‌پردازد. این گونه سیستم‌ها را در طبیعت نیز می‌توان یافت. به عنوان مثال پرندگان، مورچه‌ها و ماهی‌ها که در گروه‌هایی قرار می‌گیرند و همگی با یکدیگر تعامل داشته و هدف گروه خود را دنبال می‌کنند. مثلاً در گروه پرندگان، مسیر حرکت هر پرنده با توجه به مسیر حرکت گروه و وضعیت دیگر اعضا مشخص می‌شود [۱۷]. در ادبیات سیستم‌های چندعاملی به این نوع تعامل در گروه‌ها، اجماع^۲ می‌گویند و در واقع این همان الگوی پلتون می‌باشد. از دیدگاه کنترل، اجماع به معنی آن است که حالت‌های تمام عامل‌ها به طور تناوبی^۳ به مقدار مشخصی برسند. معروف‌ترین الگوریتم اجماع در حالت زمان پیوسته به صورت زیر می‌باشد [۱۷].

$$\dot{x}_i(t) = -\sum_{j=1}^n a_{ij}(t)[x_i(t) - x_j(t)] \quad (6)$$

به طوری که مقدار $a_{ij}(t)$ درایه (i, j) ماتریس همسایگی $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ و x_i متغیر حالت i امین عامل می‌باشد. در [۱۸] مسئله اجماع به طور دقیق‌تر بررسی شده است. بهترین راه حل برای حل مسائل اجماع استفاده از تئوری گراف‌ها می‌باشد. در [۱۹] و [۲۰] نویسندگان از تئوری گراف‌ها کمک گرفته‌اند و پایداری آرایش گروه‌های عامل‌های خطی را بررسی کرده‌اند. همچنین در [۲۱] یک کنترل کننده پلتون با توجه به تئوری اجماع و بدون در نظر گرفتن مانع و حملات سایبری ارائه شده است. به کمک تئوری گراف‌ها می‌توان قانون اجماع را به صورت زیر بازنویسی کرد، به طوری که $X = [x_1, \dots, x_n]$ متغیرهای حالت و \mathcal{L}_n ماتریس لاپلاسیان می‌باشد.

$$\dot{x}(t) = -\mathcal{L}_n x(t) \quad (7)$$

در این پروژه تمامی خودروها یک نقطه (مرکز خودرو) در نظر گرفته شده و موقعیت خودرو، مختصات آن نقطه می‌باشد. همانطور که گفته شد در اجماع هدف آن است تا متغیرهای حالت تمام عامل‌ها، که در اینجا موقعیت خودروها هست، به یک مقدار معینی برسد اما برای

به موقعیت جدید با زاویه مشخص شده خواهد رفت. همچنین زاویه مطلوب با توجه به مکان مطلوب و مکان فعلی ربات به صورت $\theta_{des} = a \tan 2(y_d - y, x_d - x)$ بدست می‌آید. که در آن (x_d, y_d) موقعیت مطلوب و (x, y) موقعیت کنونی ربات می‌باشد. در واقع اگر دو نقطه موقعیت فعلی و موقعیت مطلوب را دو رأس غیر قائم مثلث قائم الزاویه در نظر گرفته شود، این زاویه به صورت بالا به راحتی بدست خواهد آمد. برای محاسبه خطای زاویه، از تابع atan2 که یک تابع چهار ربعی می‌باشد، استفاده شده است. معادلات حاکم بر ربات به صورت زیر است [۱۶].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= V \cos(\theta) \\ \dot{y} &= V \sin(\theta) \\ \dot{\theta} &= \omega = \frac{V_r - V_l}{L} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن \dot{x} تغییرات مکان نسبت به محور x ، \dot{y} تغییرات مکان نسبت به محور y و $\dot{\theta}$ سرعت زاویه‌ای ربات می‌باشد. همچنین سرعت حرکت ربات برابر با میانگین سرعت موتورهای چپ و راست می‌باشد و سرعت موتور چپ و راست به صورت زیر بدست می‌آید [۱۰].

$$\begin{aligned} V_r &= (V + \frac{L}{2} \omega) \\ V_l &= (V - \frac{L}{2} \omega) \end{aligned} \quad (2)$$

ج: محاسبه گین کنترلی و تنظیم سرعت خطی ربات

اگر از معادلات (۱) تبدیل لاپلاس گرفته شود تابع تبدیل سیستم بدست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} s \cdot \theta(s) &= \omega(s) \\ G(s) &= \frac{\theta(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{s} \end{aligned} \quad (3)$$

این تابع تبدیل نوع یک می‌باشد بنابراین تنها با یک گین ساده سیستم حلقه بسته به خطای حالت دائم صفر خواهد رسید. تابع تبدیل حلقه بسته در معادله (۴) بدست آمده که تنها یک قطب در $s = -K_p$ دارد و بر اساس این نکته که کوچکترین ثابت زمانی سیستم باید حداقل ۱۰ برابر ثابت زمانی کنترلر باشد، مقدار K_p بدست خواهد آمد.

$$G_c(s) = \frac{K_p(s)G(s)}{1+K_pG(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} \quad (4)$$

سرعت خطی ربات در بعضی از مقالات ثابت در نظر گرفته شده است، اما در پیاده‌سازی عملی اگر ربات به مکان مطلوب برسد، با توجه به خطا و نویزی که وجود دارد و همچنین کنونی ربات، ربات از آن مکان مطلوب عبور خواهد کرد؛ لذا در این مقاله سرعت ربات متناسب با فاصله ربات از موقعیت مطلوب مطابق زیر در نظر گرفته شده است.

$$V = K \times \sqrt{(x_d - x)^2 + (y_d - y)^2} \quad (5)$$

$$rep_{ij}[k] = \frac{\eta G_{ij}[k] + 1}{\eta k + 2} \quad (10)$$

۳ فاز شناسایی: در صورتی که مقدار اعتبار یک همسایه در نزد یک گره از حدی پایین تر شود، آن همسایه ایزوله خواهد شد.

۴ فاز بروزرسانی: برای به کارگیری اعتبار بدست آمده در مراحل قبلی و اعمال آن در کنترلر اجماع از رابطه زیر استفاده می شود.

$$d_{ij}[k] = \frac{rep_{ij}[k]}{\sum_{j=1}^n rep_{ij}[k]} \quad (11)$$

که در اینجا $d_{ij}[k]$ مقدار وزن تنظیم شده ز آمین گره توسط i آمین گره در لحظه k می باشد. در واقع در رابطه بالا هر آبرو تقسیم بر مجموع آبروها می شود تا اعداد بدست آمده نرمال سازی شده و جمع عناصر سطری ماتریس D برابر یک باشد. پس از بدست آمدن مقادیر بروز شده ماتریس D ، گره ها طبق رابطه اجماع زیر بروزرسانی می شوند.

$$z_i[k+1] = \sum_{j=1}^n d_{ij}[k] z_j[k], \quad i = 1, \dots, n \quad (12)$$

در این الگوریتم اگر تعداد گره های بدرفتار، کمتر از درجه اتصال شبکه آنگاه همه گره ها به صورت مجانبی به اجماع می رسند.

۳-۳- کنترل کننده دوری از مانع

در پلتون لازم می باشد تا خودروها علاوه بر حرکت در مسیر گروه خود، مراقب موانع احتمالی در طول مسیر بوده و حرکت خود را به گونه ای تنظیم کنند تا به موانع برخورد نکنند. برای این کنترل کننده ایده های مختلفی ارائه شده است و در [۲۳] نیز یک راه کار جهت دوری از موانع در پلتون ارائه شده است. در این پروژه برای دوری از موانع از روش میدان پتانسیل مصنوعی استفاده شده است [۲۴]. در این روش فرض می شود که ربات ذره ای نقطه ای با بار الکتریکی تحت تأثیر یک میدان دافعه پتانسیل الکتریکی ناشی از موانع قرار دارد. لذا نیرو را مطابق رابطه زیر می توان تعریف کرد.

$$F_{rep,ij}(q) = \begin{cases} \eta_{ij} \left(\frac{1}{\rho(O_i(q))} - \frac{1}{\rho_{0j}} \right) \frac{1}{\rho_j^2(O_i(q))} \nabla \rho_j(O_i(q)), & \rho_j(O_i(q)) \leq \rho_{0j} \\ 0, & \text{ow} \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه فوق $\rho_j(O_i(q))$ کوتاه ترین فاصله بین i آمین مبدأ دستگاه مختصات و j آمین مانع ρ_{0j} فاصله تأثیر ز آمین مانع، η_{ij} مقدار ثابت و $\nabla \rho_j(O_i(q))$ بردار واحدی از ربات به سمت $O_i(q)$ می باشد.

۳-۴- طراحی کنترل کننده نهایی

با توجه به توضیحات داده شده در قسمت قبل، کنترل کننده نهایی در این قسمت با توجه به اهداف کنترلی و نمونه مورد مطالعه در این بخش طراحی می گردد. در این پروژه یک مانع و چهار ربات در

شکل گیری پلتون باید خودروها از یکدیگر فاصله معینی داشته باشند؛ لذا با توجه به طول خودرو و فاصله ای که باید از دیگر خودروها داشته باشد یک مقدار ثابت برای آن خودرو مشخص می شود و آن مقدار ثابت با حاصل اجماع جمع می شود. این مقادیر ثابت با نام ماتریس آرایش بندی (F) نمایش داده شده و به فرم ماتریسی به صورت معادله (۸) می باشد. به این کار آرایش بندی اجماع محور خودروها گفته می شود.

$$\dot{x}(t) = -L_n x + F \quad (8)$$

۳-۲- کنترل کننده تاب آور در مقابل حملات سایبری

با توجه به ارتباطات بی سیم میان خودروها در پلتون، ممکن است حمله سایبری به شبکه مخابراتی آنها صورت گیرد. حمله سایبری باعث بدرفتاری یک عامل می شود که به آن عامل، عامل بدرفتار^۱ می گویند. در واقع در اینجا فایروال ها و آنتی ویروس ها شبکه مخابراتی نتوانسته اند حمله را تشخیص دهند و حمله سایبری توانسته از لایه های شبکه عبور کند؛ در چنین موقعی کنترل تاب آور حمله را تشخیص می دهد و از سیستم در مقابل حمله حفاظت می کند. در این پروژه فرض می شود که به رهبر گروه حمله سایبری صورت نمی گیرد. البته این موضوع که رهبر گروه حفظ می شود، مانع از عملکرد نامناسب پلتون هنگامی که به یک خودرو پیرو حمله صورت گیرد نمی شود؛ چرا که با توجه به گراف ارتباطی، ارتباط میان خود عامل های پیرو موجب به هم ریختن گروه هنگام حمله به یک عامل می باشد و از طرفی اگر این ارتباط میان عامل ها پیرو نباشد و گراف ارتباطی به شکلی باشد که فقط هر عامل با رهبر در ارتباط باشد، آنگاه شاخص های عملکردی کنترل کننده به شدت افت خواهد کرد و عملکرد مناسبی در حالت عادی نخواهد داشت.

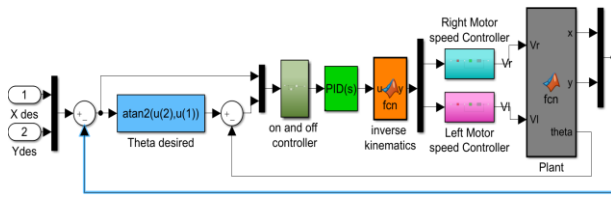
در این مقاله جهت جلوگیری از حملات سایبری از الگوریتم کنترل تاب آور بر پایه آبرو^۱ کمک گرفته شده است. در این الگوریتم از یک تخمین گر استفاده می شود که بر اساس تخمین آن و مقدار حالت آینده، هر عامل به همسایه های خود آبرویی اختصاص می دهد و بر اساس این آبرو میزان تأثیر اطلاعات آن همسایه در رفتار این عامل تعیین می شود. این الگوریتم از چهار مرحله به ترتیب زیر تشکیل شده است [۲۲]:

۱) فاز تشخیص: یک نظارت کننده جاسازی شده در هر عامل، رفتار همسایه های آن عامل را نظارت می کند. در صورتی که خروجی همسایه نزدیک مقدار مورد انتظار باشد پارامتر G_{ij} را به عنوان تشویق آن عامل به صورت زیر زیاد می کند.

$$G_{ij}[k] = \begin{cases} G_{ij}[k-1] + 1, & |r_j[k] - z_j[k]| \leq \gamma(k, \delta) \\ G_{ij} & , |r_j[k] - z_j[k]| > \gamma(k, \delta) \end{cases} \quad (9)$$

۲) فاز تسکین دهی: در اینجا مفهومی به نام مدیر اعتبار طبق رابطه (۱۰) تعریف می شود که نمایانگر میزان اعتبار گره های همسایه نزد یک گره می باشد. مقدار η سرعت تشویق شدن را مشخص می کند.

به کامپیوتر (سرور) متصل شده و پس از دریافت موقعیت مطلوب خود، با توجه به حلقه کنترلی که در شکل (۵) نشان داده شده است به سمت آن موقعیت حرکت می‌کند. قسمت‌های مختلف حلقه کنترلی بدین شرح است:



شکل(۵): حلقه کنترول جهت کنترول حرکت ربات

۱) کنترول کننده ی خاموش روشن:

برای آنکه هنگامی که ربات به موقعیت مطلوب رسید متوقف شود و کنترول آن بهتر صورت گیرد یک محدوده حول موقعیت مطلوب برای آن در نظر گرفته شده است و اگر ربات در آن محدوده قرار گیرد متوقف خواهد شد و لذا اگر نویزی در فرآیند گرفتن تصویر دوربین یا داده‌ی قطب‌نما اتفاق افتاده باشد، این نویز حذف خواهد شد.

۲) کنترول تناسبی جهت رسیدن به موقعیت و جهت مطلوب:

همانطور که قبلاً گفته شد، سرعت ربات متناسب با فاصله ربات از نقطه مطلوب در نظر گرفته شده است. لذا طبق روابط بخش دوم، دو معادله زیر برقرار است.

$$\begin{aligned} v &= k_v \times \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \\ \omega &= k_\omega \times \theta_{des} \end{aligned} \quad (18)$$

با توجه به اشباع در سرعت خطی و زاویه‌ای، ممکن است ربات از کنترول خارج شود؛ لذا باید بازه‌ی تغییرات این دو به هم نزدیک باشند. که ضرایب به صورت $k_v = 0.1$, $k_\omega = 70$ تنظیم شده‌اند.

۳) کنترول PI برای رسیدن موتورها به سرعت مطلوب:

داخلی‌ترین حلقه کنترلی، حلقه کنترول سرعت موتورهای ربات می‌باشد که در آن از یک کنترول کننده PI استفاده شده است.

۴-۳- تعیین نرخ نمونه‌برداری کنترولرها و ایجاد مانع

نرخ نمونه‌برداری و زمان اجرای حلقه‌ی کنترلی در جدول (۱) آمده است.

نام کنترول کننده	زمان نمونه برداری	بدترین زمان اجرا
کنترولر موقعیت	۱۰۰ ms	۱۴ ms
کنترولر موتورها	۱۵ ms	۴ ms

جدول(۱): برنامه‌ریزی وظایف

همان طور مشاهده می‌شود، بهره‌برداری از پردازشگر به اندازه‌ی ۴۱٫۶٪ است. از آنجا که وظایف سیستم‌عامل نیز بیش از ۱۰٪ نمی‌باشد؛ پس می‌توان از انجام وظایف اطمینان داشت. نحوه ارتباط ربات‌ها با سرور و دوربین در شکل (۶) نشان داده شده است. در این پروژه برای ایجاد

نظر گرفته شده است. در واقع فرمان کنترلی از دو قسمت زیر تشکیل شده است.

$$U_{Control} = U_{Consensus} + U_{Obstacle Avoidance} \quad (14)$$

مقدار $U_{ObstacleAvoidance}$ دو مؤلفه دارد که در راستای X به

صورت زیر می‌باشد و در راستای Y نیز مشابه آن است.

$$F_{xObsAv} = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{R_{Obs}} \right) \frac{1}{d} \frac{X_{Robot} - X_{Obs}}{|X_{Robot} - X_{Obs}|} & d \leq R_{Obs} \\ 0 & OW \end{cases} \quad (15)$$

در رابطه بالا R_{Obs} شعاع موثر مانع می‌باشد و همچنین

$$d = \sqrt{(X_{Robot} - X_{Obs})^2 + (Y_{Robot} - Y_{Obs})^2} \quad (16)$$

همچنین مقدار $U_{Consensus}$ بر اساس الگوریتم اجماع تاب‌آور بر مبنای آبرو تنظیم می‌شود. در این الگوریتم، یک گراف کامل با چهار گره در نظر گرفته شده است. و طبق الگوریتم، برای هر ربات داریم

$$z_i = \sum_{j=1}^n d_{ij} z_j[k], \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (17)$$

که در آن $z_j = [x \ y]^T$ موقعیت هر ربات می‌باشد.

۴- نحوه پیاده‌سازی عملی

در این بخش نحوه پیاده‌سازی کنترول کننده مورد نظر بر روی ربات‌ها توضیح داده خواهد شد.

۴-۱- موقعیت‌یابی ربات‌ها

برای تشخیص موقعیت خودروها در عمل می‌توان از سنسورهای GPS با دقت مناسب و دیگر سنسورهای تشخیص موقعیت و فاصله استفاده کرد و سپس با ادغام داده‌های سنسورها موقعیت خودروها را بدست آورد. به عنوان مثال در [۲۵] استفاده از سنسور GPS در پلتون بررسی شده است. همچنین در [۲۶] به بررسی نحوه به‌کارگیری سنسورها و عملکرد آنها در سیستم پلتون پرداخته شده است. در این پروژه با توجه به پیاده‌سازی نمونه آزمایشگاهی، بر روی هر ربات یک برهه رنگی چسبانده شده است و موقعیت آن به کمک پردازش تصویر بدست می‌آید. پس از پردازش تصویر، موقعیت ربات در یک صفحه به صورت مختصات x و y بدست خواهد آمد که در واقع موقعیت بر اساس پیکسل می‌باشد و با تغییر ارتفاع دوربین این اعداد متفاوت خواهند شد. در اینجا با توجه به موقعیت دوربین، ربات‌ها در یک صفحه 400×600 پیکسلی حرکت می‌کنند. برای یکسان سازی این اعداد با اعداد موقعیت ربات مجازی، از یک ضریب که به صورت سعی و خطا بدست آمده است کمک گرفته می‌شود.

۴-۲- انجام محاسبات کنترلی و تعامل بین ربات‌ها

در این پروژه تمامی محاسبات پردازش تصویر و الگوریتم کنترلی در کامپیوتر انجام می‌شود. ربات‌ها با ارتباط TCP/IP به عنوان کلاینت

موقعیت مانع به صورتی انتخاب شده است که بیشترین تاثیرش بر روی یک ربات باشد تا نحوه مسیر حرکت ربات نزدیک مانع، و تاثیر این تغییر مسیر بر روی پلتون مشاهده شود و شعاع آن نیز سعی شده است دازه رباتها طوری انتخاب شود تا یک محدوده امن، جهت جلوگیری از برخورد، به وجود آید. همچنین فرض شده است که موقعیت ربات بدرفتار، مبدأ مختصات می باشد. نتیجه شبیه سازی در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل نمودار آبی رنگ مربوط به ربات رهبر می باشد. همانطور که مشاهده می شود ربات های پیرو توانسته اند مسیر ربات رهبر را دنبال کنند و همچنین هنگامی که ربات با نمودار قرمز رنگ، به مانع نزدیک شده است اندکی تغییر مسیر داده و پس از گذر از مانع، به مسیر خود بازگشته است.

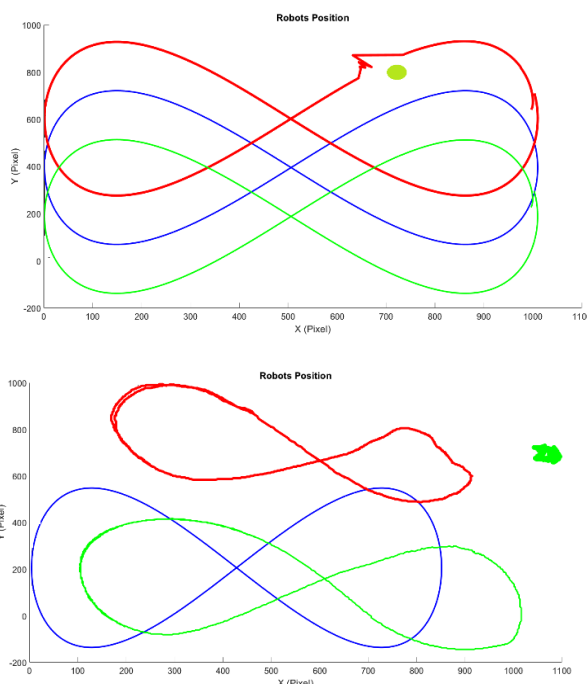
مانع در مسیر رباتها از یک برگه رنگی استفاده شده است و موقعیت آن همانند موقعیت رباتها بدست می آید. اگر مانع حرکت کند به راحتی موقعیت جدید آن مشخص شده و کنترلر مانع برخورد رباتها با مانع خواهد شد.



شکل (۶): نحوه ارتباط دوربین و سرور و رباتها

۶- نتایج پیاده سازی

برای پیاده سازی نیز از همان داده های شبیه سازی قسمت قبل استفاده شده است و ربات رهبر و ربات بدرفتار مجازی در نظر گرفته شده اند. همچنین پارامترهای مانع به صورت $\eta = 9 \times 10^6$ و $R_{Obs} = 345$ می باشد و همانند قسمت شبیه سازی، مسیر ربات رهبر به صورت نماد بینهایت ریاضی در نظر گرفته شده است که نسبت به سایر اشکال مانند دایره، فرم پیچیده تری دارد. مکان ربات بدرفتار نیز در مبدأ مختصات در نظر گرفته شده است. نتایج پیاده سازی در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل نمودار سبز و قرمز مربوط به ربات های پیرو، نمودار آبی مربوط به ربات رهبر و نقطه سبز رنگ موقیت مانع می باشد. با توجه به نویز فرآیند پردازش تصویر و تفاوت اندک مقیاس های ربات رهبر و ربات پیرو (که در بخش موقعیت یابی رباتها توضیح داده شد) مقداری مسیر حرکت ربات رهبر و ربات های پیرو متفاوت شده است که می توان به کمک دوربینی با رزولوشن بالاتر این خطاها را رفع کرد. همانطور که مشاهده می شود دو ربات پیرو توانسته اند الگوی مسیر ربات رهبر (نمودار آبی رنگ) را دنبال کنند و به دلیل نزدیکی ربات اول (نمودار قرمز) به مانع، رفتار آن تحت تاثیر مانع قرار گرفته و پس از عبور از کنار مانع مجدد به مسیر پلتون تعیین شده بازگشته است.



شکل (۷): نتایج شبیه سازی (شکل بالا) و پیاده سازی (شکل پایین)

۵- نتایج شبیه سازی

برای شبیه سازی فرض شده است که چهار ربات وجود دارد که یکی از آنها رهبر می باشد و همچنین به یکی دیگر از رباتها حمله سایبری شده است. همچنین از کنترلی که در انتهای بخش سوم بیان شد با ماتریس $Formation = [0 \ 136 \ -136 \ 0]$ استفاده شده است. مسیر حرکت ربات رهبر به شکل نماد بینهایت ریاضی می باشد که معادله ریاضی آن به صورت زیر می باشد.

$$\begin{aligned} x_{Leader} &= 550 \cos(t) + 550 \\ y_{Leader} &= 130 \times \frac{\sin(2t)}{0.4} + 380 \end{aligned} \quad (19)$$

همچنین مانع با پارامترهای زیر در نظر گرفته شده است.

$$\begin{aligned} \eta &= 20 \times 10^5 \\ R_{Obs} &= 450 \\ (X_{Obs}, Y_{Obs}) &= (800, 800) \end{aligned} \quad (20)$$

۷- نتیجه گیری

در این مقاله سعی شد تا با تغییر دیدگاه در خودروهای خودران و کنترل آن ها به صورت گروهی، مشکلات سیستم های حمل و نقل بین شهری مرتفع شود و طراحی یک سیستم پلتون به کمک کنترل کننده تاب آور اجماع با قابلیت دوری از مانع صورت گرفت. مهمترین مزیت این کنترل کننده آن است که این سه هدف (پلتون، جلوگیری از حمله سایبری و جلوگیری از برخورد با مانع) در داخل یک کنترل کننده گنجانده شده است. در انتها کنترل کننده پیشنهاد شده شبیه سازی شده و همچنین کنترلر به طور عملی بر روی دو خودرو آزمایشگاهی پیاده سازی گردید. برای پیاده سازی این سیستم پلتون بر روی خودروهای سنگین، کنترل کننده پیشنهادی تغییر نخواهد کرد و

- conference on cyber-physical systems, pages 159–167. ACM, 2010.
- [8] J. Gong, J. Cao, Y. Zhao, Y. Wei, J. Guo, and W. Huang, "ScienceDirect Sampling-based cooperative adaptive cruise control subject to communication delays and actuator lags," *Math. Comput. Simul.*, 2019.
- [9] W. Wang, B. Han, Y. Guo, and X. Luo, "Fault-tolerant platoon control of autonomous vehicles based on event-triggered control strategy," pp. 1–13, 2020.
- [10] F. Gao, F. Lin, and B. Liu, "Distributed H infinity control of platoon interacted by switching and undirected topology," vol. 21, no. 1, pp. 259–268, 2020.
- [11] S. C. Calvert and G. Mecacci, "Full platoon control in Truck Platooning: A Meaningful Human Control perspective," 2018.
- [12] Jia, Dongyao, Lu, Kejie, and Wang, Jianping. On the network connectivity of platoon-based vehicular cyber-physical systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40:215–230, 2014.
- [13] E. Mousavinejad, F. Yang, Q. Han, Q. Qiu, and L. Vlacic, "Cyber Attack Detection in Platoon-Based Vehicular Networked Control Systems," *IEEE 27th Int. Symp. Ind. Electron.*, pp. 603–608, 2018.
- [14] R. Van Der Heijden, T. Lukaseder, and F. Kargl, "Analyzing Attacks on Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC)," 2017.
- [15] "3-Axis Digital Compass IC," Honeywell, 2010.
- [16] Kothandaraman, Kaamesh. Motion planning and control of differential drive robot. 2016.
- [17] Sheng, Long. "Lyapunov-based Control Approaches for Networked Single and Multi-agent Systems with Communication Constraints," 2010.
- [18] Olfati-Saber, Reza, J. Alex Fax, and Richard M. Murray. "Consensus and cooperation in networked multi-agent systems." *Proceedings of the IEEE* 95.1, 215-233, 2007.
- [19] Yamaguchi, Hiroaki, Tamio Arai, and Gerardo Beni. "A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations." *Robotics and Autonomous systems* 36.4, 125-147, 2001
- [20] Fax, J. Alexander, and Richard M. Murray. "Information flow and cooperative control of vehicle formations." *IEEE transactions on automatic control* 49.9, 1465-1476, 2004.
- [21] C. M. Systems, L. Zhang, J. Sun, and Q. Yang, "Distributed Model-Based Event-Triggered Leader – Follower Consensus Control for Linear," *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.*, vol. PP, pp. 1–9, 2020.
- [22] Zeng, Wente and Chow, Mo-Yuen. Resilient distributed control in the presence of misbehaving agents in networked control systems. *IEEE transactions on cybernetics*, 44(11):2038–2049, 2014.
- [23] B. Daf, F. Gechter, and P. Gruer, "Vehicle platoon and obstacle avoidance: a reactive agent approach," no. August 2011, pp. 257–264, 2013.
- [24] Park, Min Gyu, Jae Hyun Jeon, and Min Cheol Lee. "Obstacle avoidance for mobile robots using artificial potential field approach with simulated annealing." *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570). Vol. 3. IEEE*, 2001.
- [25] M. E. Cannon, C. Basnayake, S. Crawford, S. Syed, and G. Lachapelle, "Precise GPS Sensor Subsystem for Vehicle Platoon Control," no. January, 2015.
- [26] D. Su and S. Ahn, "In-vehicle sensor-assisted platoon formation by utilizing vehicular communications," vol. 13, no. 7, 2017.

تنها لازم است مدل سینماتیک خودرو مورد نظر جایگزین مدل خودروهای مورد استفاده در این پروژه شود. از جمله مهمترین پیشنهادها در ادامه این کار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) کنترل‌کننده اجماع با توجه به تأخیر و از دست دادن اطلاعات در شبکه مخابراتی طراحی شود.

(۲) با توجه به اینکه خودروهای موجود در یک گروه پلتون الزاماً یک مبدأ و یا یک مقصد ندارند و تنها در بخشی از مسیر در یک گروه قرار می‌گیرند، لذا کنترلر باید به نحوی باشد تا گراف مربوط به عامل‌ها بتواند تغییر کند و یک عامل به گراف اضافه یا از گراف حذف شود.

(۳) با توجه به اینکه حملات سایبری می‌تواند بسیار هوشمندانه صورت گیرد لذا پیشنهاد می‌شود از الگوریتم‌های پیشرفته‌تر مانند الگوریتم‌های مبتنی بر یادگیری ماشین استفاده شود.

(۴) در این پروژه فرض شد که به رهبر گروه حمله سایبری صورت نمی‌گیرد. لذا پیشنهاد می‌شود تمهیدی اندیشیده شود تا اگر به رهبر گروه نیز حمله صورت گرفت، پلتون بتواند به کار خود به نحو احسن ادامه دهد.

سیاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از آقای محمد کاشانی به خاطر کمک در ساخت ربات‌ها تشکر نمایند.

مراجع

- [1] D. Jia, K. Lu, J. Wang, X. Zhang, and X. S. Shen, "A Survey on Platoon-Based Vehicular Cyber-Physical Systems," vol. XX, no. c, pp. 1–23, 2015.
- [2] Nodeh, M. T., Gholizade, H & ,Hajizadeh, A . (۲۰۱۶). استراتژی کنترل پیش بین برای مدیریت توان در خودروی Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers. (۳)۱۳ ,
- [3] امیری، امیربهار، & قاینی. (۲۰۱۹). بهبود روش شارژ سریع با استفاده از الگوریتم ژنتیک و ایجاد هماهنگی بین شارژرها در ایستگاه شارژ سریع خودروهای برقی به منظور استفاده بهینه از ظرفیت برق ایستگاه. *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*, (۱)۱۶, ۲۹–۲۱.
- [4] S. C. Calvert, W. J. Schakel, and B. Van Arem, "Evaluation and modelling of the traffic flow effects of truck platooning," *Transp. Res. Part C*, vol. 105, no. March 2018, pp. 1–22, 2019.
- [5] P. Wang, Y. Jiang, L. Xiao, Y. Zhao, and Y. Li, "A joint control model for connected vehicle platoon and arterial signal coordination," *J. Intell. Transp. Syst.*, vol. 0, no. 0, pp. 1–12, 2019.
- [6] C. Lei, E. M. Van Eenennaam, W. K. Wolterink, J. Ploeg, and G. Karagiannis, "Evaluation of CACC string stability using SUMO, Simulink and OMNeT ++," pp. 1–12, 2012.
- [7] Fallah, Yaser P, Huang, ChingLing, Sengupta, Raja, and Krishnan, Hariharan, "Design of cooperative vehicle safety systems based on tight coupling of communication, computing and physical vehicle dynamics," In *Proceedings of the 1st ACM/IEEE international*

زیر نویس ها

- ¹ Platooning heavy-duty vehicles (HDVs Platooning)
- ² cruise control (ACC) system
- ³ cooperative adaptive cruise control
- ⁴ vehicular cyber-physical system
- ⁵ cooperative vehicle safety
- ⁶ Meaningful Human Control
- ⁷ Consensus
- ⁸ Asymptotically
- ⁹ Malicious
- ¹⁰ reputation-based resilient distributed control