

موقعیت یابی خودرو چهار چرخ خودگردان با بکارگیری همجوشی داده‌ها

آمنه امینیان^۱، علیرضا خیاطیان^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شیراز، ایران، aminian.b@gmail.com

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شیراز، ایران، khayatia@shirazu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۸۸/۷/۸، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۸۸/۹/۱۲)

چکیده: در این مقاله همجوشی داده‌های سنسورها، به منظور موقعیت یابی دقیق یک خودرو چهارچرخ خودگردان، توسط الگوریتم فیلتر کالمن غیرمستقیم با ساختار پیشخور، شبیه‌سازی شده‌است. سنسورها شامل شتاب‌سنج، تاکومتر، قطب‌نما و پتانسیومتر می‌باشند. پس از معرفی خودرو و معادلات آن، فرایند شناسایی بر روی سیستم به‌منظور یافتن پارامترهای معادلات خودرو انجام شده که دارای دو مرحله می‌باشد، شناسایی پارامترهای خودرو و شناسایی پارامترهای موتورها. همچنین عمل فیلتر کردن به‌منظور حذف نویز و همچنین حذف بایاس تصادفی شتاب‌سنج با استفاده از فیلتر کالمن مستقیم و غیرمستقیم انجام شده‌است. معادلات فیلتر کالمن غیرمستقیم برای یافتن خطای موجود در سنسورها بدست آمده‌اند که معادلاتی خطی و متغیر با زمان می‌باشند و پس از اعمال تست رؤیت‌پذیری مشاهده می‌شود که معادلات به‌دست آمده رؤیت‌ناپذیر می‌باشند. با بکارگیری یک شیوه جدید مبتنی بر یافتن زیر سیستم رؤیت‌پذیر سیستم مذکور و تخمین حالات زیرسیستم فوق با استفاده از فیلتر کالمن، به حل این مساله پرداخته شده‌است. نتایج شبیه‌سازی، کارآمدی راه‌حل ارائه شده را نشان می‌دهند. همچنین در این مقاله روشی برای یافتن ماتریس‌های کوواریانس نویز فرایند و اندازه‌گیری با استفاده از فیلتر فرم‌دهنده معکوس، ارائه شده‌است.

کلمات کلیدی: خودرو چهار چرخ خودگردان، همجوشی داده‌ها، فیلتر کالمن، رؤیت‌پذیری، بایاس تصادفی شتاب‌سنج.

Positioning Four-Wheeled Autonomous Vehicle using Sensor Fusion

Abstract: In this article, sensor fusion for positioning a four wheeled autonomous vehicle, using indirect feedforward Kalman filter algorithm is simulated. Sensors such as accelerometer, tachometer, compass and potentiometer are used. At first, vehicle and its dynamic equations are introduced then system identification is done in order to find parameters of vehicle that is performed in two phases: vehicle parameters identification and motor parameters identification. Also, accelerometer noise and random bias reduction is done using direct and indirect Kalman filter. In order to remove the sensors error, indirect Kalman filter is utilized. The governing equations of error model are linear and time varying. Observability test indicates that these equations are not observable and Kalman filter implementation in such systems leads to non optimal result. A new approach for solving this problem based on finding the observable subsystem of the main system is introduced and Kalman filter is used for estimating the observable states. Simulation results show efficiency of the proposed method. Also, a new approach to find process and measurements noise covariance matrices using reverse shaping filter is presented.

Keywords: Four wheeled autonomous vehicle, Sensor fusion, Kalman filter, Observability, Accelerometer random bias.

۱- مقدمه

ندارند. خودروهای خودگردان کاربردهای فراوان در زمینه تحقیقات هوافضا و تحقیقات زیر آب، صنعت، کاربردهای نظامی، بیمارستانها و غیره را دارند. در کنترل روبات‌های متحرک دانستن موقعیت دقیق

امروزه روبات‌های متحرک و خودروهای خودگردان به طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. روبات‌های متحرک قابلیت حرکت در محیط پیرامون خود را دارا می‌باشند و در یک موقعیت فیزیکی ثابت قرار

ها را با اطلاعات ژيروسکوپ و شتاب سنج به منظور دستیابی به یک تخمین قابل اعتماد از موقعیت روبات، ترکیب نموده اند [۱]. Chung و همکارانش (۲۰۰۱) از فیلتر کالمن غیر مستقیم بفرم پسخور، برای همجوشی داده های ژيروسکوپ و مسافت پیما استفاده کردند [۲]. Park و همکارانش (۱۹۹۶) با استفاده از فیلتر کالمن غیرمستقیم، اطلاعات دریافتی از یک ژيروسکوپ و یک انکدر را با یکدیگر ترکیب کردند و از فیلتر کالمن غیر مستقیم بفرم پسخور استفاده نمودند [۳]. Tarin و همکارانش (۱۹۹۹) اطلاعات دو سنسور شتاب-سنج و انکدر را با یکدیگر ترکیب نمودند [۴]. Wonder Hart و Wolf (۱۹۹۶) اطلاعات دریافتی از ژيروسکوپ، انکدر و قطب نمای مغناطیسی را با یکدیگر ترکیب نمودند [۵]. Sasiadek و Hartana (۲۰۰۰) از فیلتر کالمن توسعه یافته مستقیم، برای ترکیب داده های سنسور مسافت پیما و سونار به منظور حذف خطای سیستماتیک سنسورهای مسافت پیما استفاده کردند [۶]. Marron و همکارانش (۲۰۰۳) به وسیله سنسور مسافت پیما و بینایی، عمل موقعیت یابی یک صندلی چرخدار را با استفاده از فیلتر کالمن توسعه یافته انجام داده اند [۷]. Alessandri و همکاران (۱۹۹۷) به منظور تخمین موقعیت روبات، داده های دریافتی از یک ژيروسکوپ و دو انکدر را با یکدیگر ترکیب نمودند [۸]. Goel و همکارانش از سنسورهای مسافت پیما و ژيروسکوپ به منظور پشتیبانی داده های سیستم موقعیت یاب جهانی^۸، در مواقعی که داده های آن در دسترس نمی باشد، استفاده نمودند [۹]. Tarin و همکاران (۲۰۰۱) نیز یک سیستم ناوبری ارزان قیمت با سنسورهای ژيروسکوپ و مسافت پیما ارائه دادند که برای ترکیب اطلاعات از فیلتر کالمن و یک روش قاعده محور^۹ استفاده شده است [۱۰]. Durrant-White و Barshan (۱۹۹۳) سیستمی شامل یک ژيروسکوپ و یک شتاب سنج ارائه نمودند که در آن از فیلتر کالمن توسعه یافته غیر مستقیم برای ترکیب اطلاعات و تخمین موقعیت و جهت استفاده شده است [۱۱]. در همان سال Vaganay و همکارانش با استفاده از دو شتاب سنج و سه ژيروسکوپ و الگوریتم فیلتر کالمن توسعه یافته به یافتن زوایای چرخش (roll)، پیچش (pitch) و سمت (yaw) یک روبات متحرک پرداختند [۱۲]. Tsai (۱۹۹۸) یک ساختار سخت افزاری و یک الگوریتم پردازش سیگنال دیجیتال را برای مکان یابی اتوماتیک یک روبات متحرک، با ترکیب اندازه گیری های انجام شده توسط سنسورهای تراسونیک و سیستم

روبات امری ضروری است. روشهای موقعیت یابی^۱ عموماً به دو دسته اصلی موقعیت یابی نسبی و موقعیت یابی مطلق تقسیم می شوند، یک نمونه سنسور برای یافتن موقعیت مطلق، قطب نمای مغناطیسی^۲ می باشد که زاویه سمت روبات^۳ را اندازه گیری می کند. مهمترین ضعف قطب نمای مغناطیسی مربوط به تغییر شکل دادن میدان مغناطیسی زمین در مجاورت خطوط انتقال نیرو و اجسام فلزی می باشد، که این امر استفاده از قطب نما را در محیط های داخلی دشوار می نماید. موقعیت یابی با استفاده از ژيروسکوپ ها و شتاب سنج ها، ناوبری اینرسی^۴ نامیده می شود. مهمترین ضعف ناوبری اینرسی، مسئله انحراف بایاس^۵ می باشد به-این صورت که خطاهای ناشی از انتگرال گیری جمع می شوند و در نتیجه دقت تخمین، با گذشت زمان کاهش می یابد. غیر از سنسورهای اینرسی، سنسورهای مسافت پیما^۶ هم برای موقعیت یابی نسبی استفاده می شوند. سنسورهای مسافت پیما، ارزان هستند و امکان کار کردن با سرعتهای نمونه برداری بالا را دارند، ولی ایده اصلی استفاده از آنها بر پایه انتگرال گیری از داده های حرکت می باشد که خطاهایی مانند لغزش چرخ و یا درجا چرخیدن چرخ، منجر به تجمع نا محدود خطاها می شود. با توجه به موارد ذکر شده قابلیت روبات برای داشتن داده قابل اعتماد و دقیق از موقعیت خود، محدود می باشد. با استفاده از همجوشی داده های سنسورها^۷ می توان داده های موجود از سنسورهای متفاوت را با یکدیگر ترکیب و داده های نامطلوب را حذف نمود و به یک خروجی نسبتاً دقیق رسید. همجوشی داده های سنسورها اغلب بوسیله تکنیک های ریاضی و با در نظر گرفتن عدم قطعیت ها در داده های مرجع انجام می-پذیرند، بین روشهای متفاوت همجوشی داده ها، استفاده از فیلتر کالمن یکی از مهمترین روشها می باشد، در بسیاری از تحقیقات فیلتر کالمن به عنوان یک رویتگر معرفی شده است، لذا رویت پذیری سیستم مسئله مهمی است که لازم است مورد توجه قرار گیرد. اگر سیستم رویت پذیر حالت نباشد، نرم ماتریس کوواریانس خطای تخمین به سمت صفر میل نمی کند و در نتیجه خطای تخمین با زیاد شدن زمان، افزایش می یابد. تحقیقات زیادی در زمینه تخمین موقعیت روبات های متحرک با استفاده از انواع مختلف سنسورها انجام شده است. Zunaidi و همکارانش (۲۰۰۶) با استفاده از فیلتر کالمن غیر مستقیم اطلاعات دریافتی از انکدر

¹ Positioning
² Magnetic compass
³ Heading angle
⁴ Inertial navigation
⁵ Bias drift
⁶ Odometer
⁷ Sensor fusion

⁸ GPS

⁹ Rule based

$$\dot{Y} = r\omega_1 \left[\begin{array}{c} (\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1) \sin \theta \\ + \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \cos \theta \end{array} \right] \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \frac{r}{a+b} \omega_1 \sin \delta_1 \quad (3)$$

$$\dot{\delta}_1 = \omega_{\delta 1} \quad (4)$$

و دینامیک آن به صورت زیر است:

$$\dot{\omega}_1 = -\frac{N_6 \omega_1 \omega_{\delta 1} + N_7 \omega_1^2}{N_5} + \frac{\tau_d}{N_5} \quad (5)$$

$$\dot{\omega}_{\delta 1} = -\frac{N_2 \omega_{\delta 1}^2 + N_3 \omega_1 \omega_{\delta 1} + N_4 \omega_1^2}{N_1} - \frac{Q_3 \sin \delta_1 (N_6 \omega_1 \omega_{\delta 1} + N_7 \omega_1^2)}{N_1 N_5} + \frac{Q_3 \sin \delta_1}{N_1 N_5} \tau_d + \frac{\tau_s}{N_1} \quad (6)$$



شکل ۱: تصویر خودرو

که در آن X و Y مختصات مرکز ثقل نسبت به دستگاه مختصات مرجع می‌باشد، θ زاویه سمت خودرو، δ_1 زاویه فرمان، ω_1 سرعت-زاویه‌ای چرخ جلو سمت چپ، $\omega_{\delta 1}$ سرعت تغییر زاویه فرمان، r شعاع چرخ، L فاصله بین چرخ‌های موازی (دوچرخ عقب یا جلو)، a فاصله مرکز ثقل خودرو از محور جلو خودرو و b فاصله مرکز ثقل خودرو از محور عقب خودرو می‌باشد. τ_d گشتاور رانش و τ_s گشتاور فرمان، به-عنوان ورودی‌های سیستم می‌باشند. N_i ها توابعی از δ_1 و Q_i ها ثوابتی وابسته به پارامترهای دینامیکی خودرو می‌باشند که برای یافتن این پارامترها نیاز به شناسایی آنها می‌باشد. شناسایی پارامترهای خودرو در دو فاز انجام می‌گیرد، یکی شناسایی پارامترهای معادلات خودرو و دیگری شناسایی پارامترهای موتورها. برای شناسایی پارامترهای معادلات خودرو در روابط (۱) تا (۶)، تعدادی از پارامترهای معادلات، مانند طول‌های مختلف خودرو را می‌توان با اندازه‌گیری مشخص نمود. در واقع پارامترهای سینماتیکی خودرو آسانتر از پارامترهای دینامیکی مشخص می‌شوند. با اضافه نمودن ترم‌های اصطکاک به روابط (۵) و

شمارش مرده^۱ ارائه داد [۱۳]. در تمامی مقالات ذکر شده تخمین موقعیت به‌نحو مطلوبی انجام پذیرفته است ولی در هیچکدام از آنها بحثی از رؤیت‌پذیری سیستم به میان نیامده است، همچنین در تمامی آنها ماتریس‌های کوواریانس نوین اندازه‌گیری و فرایند با سعی و خطا به-دست آمده‌اند.

در این مقاله همجوشی داده‌های سنسورها، برای موقعیت‌یابی یک خودرو چهارچرخ خودگردان، شبیه‌سازی شده است. فرایند شناسایی سیستم به منظور یافتن پارامترهای دینامیکی خودرو انجام شده است که با استفاده از مدل به‌دست آمده شبیه‌سازی‌ها انجام می‌پذیرند، نوین و بایاس تصادفی شتاب‌سنج با استفاده از فیلتر کالمن حذف می‌شود. پس از یافتن دینامیک خطای سیستم، که دینامیکی خطی و متغیر با زمان می-باشد، مشاهده گردید که این معادلات رؤیت ناپذیر می‌باشند، در نتیجه راه‌حل جدیدی برای بکارگیری فیلتر کالمن در سیستم‌های رؤیت‌ناپذیر ارائه شده است. همچنین، روشی برای یافتن ماتریس کوواریانس نوین فرایند و اندازه‌گیری ارائه شده است.

ساختار مقاله به این صورت است که در بخش ۲، ابتدا معادلات حالت وسیله نقلیه بیان می‌شوند و شناسایی پارامترهای خودرو متحرک ارائه می‌گردد. در بخش ۳، به همجوشی داده‌ها به کمک فیلتر کالمن اختصاص دارد؛ در این بخش مدل خطای سیستم که متشکل از مدل خطای سنسورهای مختلف می‌باشد، ارائه می‌گردد. در بخش ۴ رؤیت‌پذیری سیستم مورد بررسی قرار گرفته و راه‌حلی برای عدم رویت‌پذیری سیستم ارائه شده است. در بخش ۵، نتایج شبیه‌سازی آورده شده‌اند که کارآمد بودن روش پیشنهادی را نشان می‌دهند. نتیجه‌گیری مقاله در بخش ۶ ارائه می‌گردد.

۲- معرفی خودرو چهارچرخ و شناسایی پارامترهای سیستم

خودرو چهارچرخ مورد نظر در بخش مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز ساخته شده است که نمایی از این خودرو در شکل (۱) نشان داده شده است. سینماتیکی خودرو برحسب سرعت‌زاویه‌ای چرخ جلو، ω_1 و زاویه فرمان، δ_1 ، به صورت زیر می‌باشد:

$$\dot{X} = r\omega_1 \left[\begin{array}{c} (\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1) \cos \theta - \\ \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \sin \theta \end{array} \right] \quad (1)$$

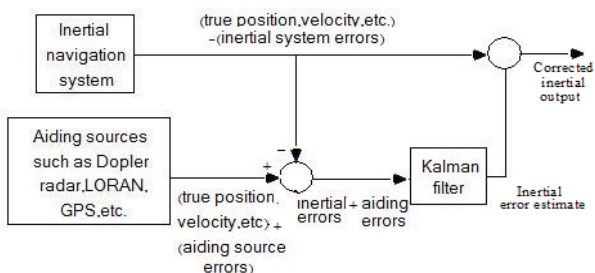
¹ Dead-reckoning

۳- همجوشی داده‌ها

همجوشی داده‌ها به کمک فیلتر کالمن مهمترین و پر کاربردترین روش ترکیب داده‌ها می‌باشد. برای اعمال فیلتر کالمن به داده‌ها ابتدا لازم است معادلات حالت سیستم و ساختار فیلتر کالمن (پیشرو) و یا (مستقیم-غیرمستقیم) مشخص گردد. در این بخش ساختار فیلتر کالمن و معادلات حالت خطای سیستم ارائه می‌گردد.

۳-۱ فیلتر کالمن

در به کارگیری فیلتر کالمن در سیستم‌های ناوبری برای جبران خطا، دو ساختار وجود دارد، فیلتر کالمن مستقیم و فیلتر کالمن غیرمستقیم. در ساختار مستقیم، حالت‌هایی مانند موقعیت و سرعت، متغیرهای حالت فیلتر می‌باشند ولی در ساختار غیرمستقیم، کمیتی همچون خطاها در موقعیت و زاویه سمت روبات جزو متغیرهای حالت فیلتر می‌باشند. در بکارگیری فیلتر کالمن غیرمستقیم نیز دو ساختار وجود دارد، ساختار پیشخور^۱ و پیشرو^۲. بلوک دیاگرام نمایش داده شده در شکل (۳) ساختار پیشرو یا حلقه باز را نشان می‌دهد. در این ساختار، مقادیر تخمین زده شده خطاهای اینرسی در خارج از بلوک ناوبری به منظور تصحیح نهایی مقادیر استفاده می‌شوند، ولی برای اصلاح داده‌های اینرسی در داخل بلوک ناوبری، استفاده نمی‌گردند. این ساختار از بعد مفهومی مفید می‌باشد. باتوجه به مزایای این روش، در این مقاله، ساختار غیرمستقیم پیشرو برای تخمین موقعیت روبات متحرک به کار گرفته می‌شود.



شکل ۳: سیستم ناوبری تجمعی، ساختار پیشرو

همچنین، نظر به اینکه ماهیت اصلی سیستم پیوسته می‌باشد، ولی اندازه-گیری‌ها ناچرا گسسته می‌باشند، از فیلتر کالمن پیوسته-گسسته استفاده می‌نمایم.

اگر معادله فرایند را بصورت:

(۶) مربوط به معادلات دینامیکی خودرو، می‌توان گشتاورهای τ_d و τ_s را به صورت زیر نوشت [۱۶ و ۱۵]:

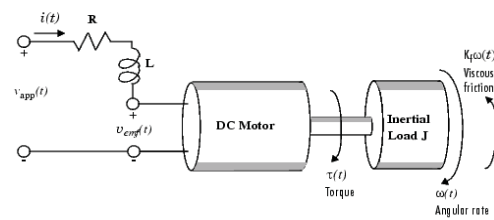
$$\tau_d = N_5 \dot{\omega}_1 + N_6 \omega_1 \omega_{\delta 1} + N_7 \omega_1^2 + F_{kd} \text{sign}(V) + (F_{sd} - F_{kd}) \exp(-(V/V_s)^\alpha + F_{vd} V) \quad (7)$$

$$\tau_s = N_1 \dot{\omega}_{\delta 1} + N_2 \omega_{\delta 1}^2 + Q_3 \dot{\omega}_1 \sin(\delta_1) + N_3 \omega_1 \omega_{\delta 1} + N_4 \omega_1^2 + F_{ks} \text{sign}(\dot{\delta}_1) + (F_{ss} - F_{ks}) \exp(-(\dot{\delta}_1/V_s)^\alpha + F_{vs} \dot{\delta}_1 \quad (8)$$

چایکه F_{vi} و F_{si} و F_{ki} بترتیب ضرایب اصطکاک سینتیکی و اصطکاک استاتیک و اصطکاک لزجی می‌باشند و V اندازه سرعت رو به جلو خودرو می‌باشد. این دو معادله را می‌توانیم به فرم زیر تبدیل کنیم:

$$\tau = Y(\delta_1, \dot{\delta}_1, \ddot{\delta}_1, \omega_1, \dot{\omega}_1) \rho \quad (9)$$

چایکه $\tau = [\tau_d \ \tau_s]$ و ρ بردار پارامترهای مستقل و $Y(\delta_1, \dot{\delta}_1, \ddot{\delta}_1, \omega_1, \dot{\omega}_1)$ تابعی ماتریسی از مقادیر اندازه‌گیری شده $\delta_1, \dot{\delta}_1, \ddot{\delta}_1, \omega_1, \dot{\omega}_1$ می‌باشد و به هیچ پارامتری از ρ بستگی ندارد. المانهای Y و ρ در [۱۸] آورده شده‌اند. سپس با اعمال ورودی‌های مختلف و بکارگیری روش حداقل مربعات پارامترهای دینامیکی خودرو بدست می‌آیند که مدل خودرو با این پارامترها، جهت شبیه‌سازی حرکت خودرو ضمن اعمال همجوشی داده‌ها بر روی داده‌های سنسورها استفاده می‌گردد. برای شناسایی پارامترهای موتورها با توجه به شماتیک موتور DC نمایش داده شده در شکل (۲):



شکل ۲: شماتیک موتور DC

تابع تبدیل جریان به ولتاژ موتور به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{I}{V_{app}} = \frac{Js + K_f}{LJs^2 + [RJ + K_f L]s + [K_m K_b + RK_f]} \quad (10)$$

که جریان موتور با گشتاورهای اعمالی به سیستم رانش و فرمان، τ_d و τ_s ، متناسب می‌باشد. با استفاده از واسطه کاربر گرافیکی MATLAB با نام ident و در نظر گرفتن یک فرم کلی برای معادله بالا و با اعمال ورودیها و خروجیهای مختلف، تخمین پارامترهای موتور هادر رابطه (۱۰) به دست می‌آیند.

¹ Feedback

² Feedforward

شتاب‌سنج تحت تاثیر یک بایاس تصادفی قرار دارد که با زمان و حرارت در حال تغییر است. قبل از اعمال همجوشی داده‌ها بر روی کل سنسورها، لازم است بایاس تصادفی شتاب‌سنج توسط یک فیلتر کالمن غیرمستقیم و سپس نویز توسط یک فیلتر کالمن مستقیم حذف شوند. برای حذف بایاس ابتدا یک مدل بایاس غیرتصادفی برای شتاب‌سنج به دست می‌آید و سپس با استفاده از آن معادلات فیلتر کالمن غیرمستقیم به دست می‌آیند. برای حذف نویز، نویز فرایند شتاب‌سنج بصورت یک فرایند Random Walk مدل شده است که با استفاده از آن معادلات فیلتر کالمن مستقیم به دست می‌آیند [۱۸] با در نظر گرفتن شتاب در راستای X و Y بصورت زیر:

$$a_{x-mf} = a_x + \delta a_x \quad (19)$$

$$a_{y-mf} = a_y + \delta a_y \quad (20)$$

که a_{x-mf} و a_{y-mf} شتاب‌های اندازه‌گیری شده پیش فیلتر شده، در دستگاه مختصات روبات می‌باشند، a_x و a_y مقادیر صحیح شتاب و δa_x و δa_y خطاها می‌باشند. با استفاده از رابطه زیر، آنها را به دستگاه مختصات مبنا منتقل می‌نماییم:

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{xa-mf} \\ \dot{V}_{ya-mf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{x-mf} \\ a_{y-mf} \end{bmatrix} \quad (21)$$

V_{xa-mf} و V_{ya-mf} سرعت‌های محاسبه شده از داده‌های شتاب‌سنج می‌باشند. با لحاظ نمودن خطای موجود در سرعت و موقعیت به صورت زیر:

$$V_{xa-mf} = V_{xa} + \delta V_{xa} \quad (22)$$

$$V_{ya-mf} = V_{ya} + \delta V_{ya} \quad (23)$$

$$X_{a-mf} = X_a + \delta X_a \quad (24)$$

$$Y_{a-mf} = Y_a + \delta Y_a \quad (25)$$

$$\theta_m = \theta + \delta \theta \quad (26)$$

که در آن مقادیر دارای اندیس mf مقادیر اندازه‌گیری شده پیش-فیلتر شده می‌باشند، مقادیر دارای اندیس δ مقادیر خطاها و V_{xa} ، V_{ya} ، X_a ، Y_a و θ مقادیر صحیح سرعت و موقعیت می‌باشند. با جایگذاری معادلات (۲۲) تا (۲۶) در (۲۱)، داریم:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{xa} + \delta \dot{V}_{xa} \\ \dot{V}_{ya} + \delta \dot{V}_{ya} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta + \delta \theta) & -\sin(\theta + \delta \theta) \\ \sin(\theta + \delta \theta) & \cos(\theta + \delta \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x + \delta a_x \\ a_y + \delta a_y \end{bmatrix} \quad (27)$$

در نتیجه دینامیک خطای سرعت شتاب‌سنج به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\delta \dot{V}_{xa} = \cos \theta \cdot \delta \dot{a}_x - \sin \theta \cdot \delta \dot{a}_y + (\sin \theta \cdot a_x + \cos \theta \cdot a_y) \delta \dot{\theta} \quad (28)$$

$$\frac{d}{dt} X_t = AX_t + Bu_t + v_t \quad (11)$$

که v_t نویز سفید گوسی با میانگین صفر و کوواریانس Σ_1 می‌باشد و معادله اندازه‌گیری‌ها را به صورت زیر:

$$Y_t = CX_t + e_t \quad i=1,2,3,\dots \quad (12)$$

در نظر بگیریم؛ که e_t نویز سفید گوسی با میانگین صفر و کوواریانس R_2 می‌باشد. معادلات فیلتر کالمن پیوسته-گسسته برای تخمین حالت X بصورت زیر می‌باشند:

$$\frac{d}{dt} \hat{X}_{t|t_i} = A \hat{X}_{t|t_i} \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} P_{t|t_i} = AP_{t|t_i} + P_{t|t_i} A^T + \Sigma_1 \quad (14)$$

$$K_{t_{i+1}} = P_{t_{i+1}|t_i} C^T [C P_{t_{i+1}|t_i} C^T + R_2]^{-1} \quad (15)$$

$$\Sigma_{t_{i+1}} = Y_{t_{i+1}} - C \hat{X}_{t_{i+1}} \quad (16)$$

$$\hat{X}_{t_{i+1}|t_{i+1}} = \hat{X}_{t_{i+1}|t_i} + K_{t_{i+1}} \Sigma_{t_{i+1}} \quad (17)$$

$$P_{t_{i+1}|t_{i+1}} = [I - K_{t_{i+1}} C] P_{t_{i+1}|t_i} \quad (18)$$

در بخش‌های بعد، با بکارگیری روابط فوق، همجوشی داده‌های سنسورها برای خودرو متحرک شبیه‌سازی خواهد شد.

۳-۲ دینامیک خطای سیستم

مهمترین مرحله برای بکارگیری فیلتر کالمن، یافتن مدل فضای حالت فرایند تصادفی تحت بررسی است، که اینکار با استفاده از معادلات دینامیکی و سینماتیکی موجود برای فرایند تصادفی تحت بررسی امکان‌پذیر می‌باشد. برای خودرو متحرک چهار سنسور در نظر گرفته شده است، یک شتاب‌سنج دو درجه آزادی ADXL202JE، یک تاکومتر، که بر روی چرخ سمت چپ جلو نصب می‌باشد، یک پتانسیومتر که زاویه فرمان را اندازه‌گیری می‌نماید و یک قطب نمای KVH-C100 که زاویه سمت وسیله نقلیه را اندازه‌گیری می‌نماید. برای یافتن دینامیک خطای سیستم لازم به یافتن مدل خطای تک تک سنسورها می‌باشد، مدل خطای شتاب‌سنج به دینامیک سیستم مربوط نمی‌باشد و از روابطی که بین سرعت، موقعیت و شتاب وجود دارد به دست می‌آید در حالیکه مدل خطای تاکومتر به سینماتیکی خودرو مربوط می‌باشد. مدل خطای قطب‌نما با مشاهده عملکرد آن به دست می‌آید و برای پتانسیومتر خطایی در نظر گرفته نشده است.

۳-۲-۱ مدل خطای شتاب‌سنج

قبل از یافتن مدل خطای شتاب‌سنج، توجه به این نکته ضروری است که علاوه بر نویز موجود در خروجی که نویز سفید گوسی می‌باشد،

که در آن مقادیر دارای اندیس mf مقادیر اندازه‌گیری شده پیش-فیلتر شده ناشی از سنسور مسافت پیمایی باشند. مقادیر ω_1, X_o, Y_o و θ_o مقادیر صحیح و مقادیر دارای δ مقادیر خطای کمیت می‌باشند. براساس مدل سینماتیکی خودرو (روابط (۱) تا (۳)) مدل خطا برای داده‌های تاکومتر به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\delta \dot{X}_o = r \left[\left(\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1 \right) \cos \theta - \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \sin \theta \right] \delta \omega_1 + r \omega_1 \left[-\left(\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1 \right) \sin \theta - \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \cos \theta \right] \quad (40)$$

$$\delta \dot{Y}_o = r \left[\left(\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1 \right) \sin \theta + \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \cos \theta \right] \delta \omega_1 + r \omega_1 \left[\left(\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1 \right) \cos \theta - \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \sin \theta \right] \delta \theta. \quad (41)$$

$$\delta \dot{\theta}_o = \frac{r}{a+b} \sin \delta_1 \delta \omega_1 \quad (42)$$

برای یافتن دینامیک خطای سرعت زاویه‌ای تاکومتر، پس از ثبت داده‌های پیش‌فیلتر شده تاکومتر و حذف یک بایاس DC و حذف یک نویز سفید گوسی به‌عنوان نویز اندازه‌گیری، از فیلتر فرم‌دهنده معکوس برای ارتباط دادن نویز باقیمانده تاکومتر به نویز سفید گوسی با میانگین صفر استفاده می‌نماییم، که ارتباط دینامیک خطای تاکومتر با نویز سفید گوسی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\delta \dot{\omega}_1 = -\frac{0.2}{T} \delta \omega_1 + \omega_\omega \quad (43)$$

که ω_ω نویز سفید گوسی است که پس از انجام تست‌های مختلف، میانگین صفر و واریانس 0.0242 برای آن به دست آمده است.

۳-۲-۳ مدل خطای قطب‌نما

در مورد قطب‌نما، خطا بواسطه لرزش بدنه روبات وجود دارد، که آن را به صورت زیر نمایش می‌دهیم:

$$\delta \theta_c = \theta_{c-m} - \theta_c \quad (44)$$

که با توجه به مشاهدات انجام شده، برای خطای قطب‌نما دینامیک زیر را برای آن در نظر می‌گیریم:

$$\delta \dot{\theta}_c = -1 \quad (45)$$

۴-۲-۳ ۴-معادلات حالت سیستم

اندازه‌گیری‌های موجود برای فیلتر کالمن از تفاضل داده‌های محاسبه شده از خروجی سنسورهای اینرسی و سایر سنسورها حاصل می‌شود و به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$y_1 = \delta \dot{x}_o - \delta \dot{x}_a + e_1 \quad (46)$$

$$\delta \dot{V}_{ya} = \sin \theta \delta \dot{x}_x + \cos \theta \delta \dot{x}_y - (\cos \theta a_x - \sin \theta a_y) \delta \theta \quad (29)$$

که زاویه سمت تصحیح نشده می‌باشد که به دلیل کوچک بودن $\delta \theta$ مقدار خطا در محاسبه \sin و \cos بی‌تاثیر است. دینامیک خطای موقعیت به صورت زیر می‌باشد:

$$\delta \dot{X}_a = \delta V_{xa} \quad (30)$$

$$\delta \dot{Y}_a = \delta V_{ya} \quad (31)$$

که در آن δX_a و δY_a خطای موقعیت ناشی از اندازه‌گیری شتاب‌سنج و δV_{xa} و δV_{ya} خطای سرعت ناشی از این سنسور می‌باشد. برای یافتن دینامیک خطای شتاب پس از ثبت داده‌های پیش‌فیلتر شده شتاب‌سنج و بررسی آن، از یک فیلتر فرم‌دهنده معکوس به فرم زیر که بر روی داده‌های سنسورها در حالت سکون عمل می‌نمایند، برای ارتباط دادن نویز باقیمانده شتاب‌سنج به نویز سفید گوسی با میانگین صفر، استفاده می‌نماییم:

$$n = (d(i) - a \times d(i-1)) / k \quad (32)$$

پارامترهای a و k با سعی و خطا به دست می‌آیند، به طوری که n نویز سفید گوسی شود. سپس ارتباط $\dot{d}(t)$ با نویز n به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{d}(t) = (k \times n) / T + (a-1) / dt \times d(t-1) \quad (33)$$

که در آن T زمان نمونه‌برداری می‌باشد که مقدار آن 0.048 ms است، معادلات خطای شتاب به صورت زیر می‌باشند:

$$\delta \dot{a}_x = \omega_{ax} \quad (34)$$

$$\delta \dot{a}_y = \omega_{ay} \quad (35)$$

که ω_{ax} و ω_{ay} هر دو نویز سفید گوسی می‌باشند و پس از انجام تست‌های مختلف، میانگین صفر و واریانس 0.0166 برای آنها به دست آمده است.

روابط (۲۸)، (۲۹)، (۳۰)، (۳۱)، (۳۴) و (۳۵) معادلات دینامیکی خطای شتاب‌سنج می‌باشند که در همجوشی داده‌ها به کمک فیلتر کالمن استفاده می‌شوند.

۳-۲-۳ مدل خطای تاکومتر

با توجه به سینماتیک وسیله نقلیه و با تعریف خطاهای متغیرها ناشی از تاکومتر به صورت زیر:

$$\delta \omega_1 = \omega_{mf} - \omega_1 \quad (36)$$

$$\delta X_o = X_{o-mf} - X_o \quad (37)$$

$$\delta Y_o = Y_{o-mf} - Y_o \quad (38)$$

$$\delta \theta_o = \theta_{o-mf} - \theta_o \quad (39)$$

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & A_{13} & A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{23} & A_{24} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{r \sin \delta}{a+b} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-0.2}{T} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta & (a_x \sin \theta + a_y \cos \theta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta & -(a_x \sin \theta - a_y \cos \theta) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$A_{13} = r\omega(-\cos \delta - \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta) \sin \theta - \frac{b}{a+b} \sin \delta \cos \theta$$

$$A_{14} = r((\cos \delta + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta) \cos \theta - \frac{b}{a+b} \sin \delta \sin \theta)$$

$$A_{23} = r\omega((\cos \delta + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta) \cos \theta - \frac{b}{a+b} \sin \delta \sin \theta)$$

$$A_{24} = r((\cos \delta + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta) \sin \theta + \frac{b}{a+b} \sin \delta \cos \theta)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

همانطور که دیده می‌شود، معادلات خطای سیستم، خطی و متغیر با زمان می‌باشند. بلوک دیاگرام ساختار پیشرو فیلتر کالمن غیرمستقیم برای تخمین موقعیت روبات متحرک با چهار سنسور، در شکل (۴) آورده شده‌است.

$$y_2 = \delta y_o - \delta y_a + e_2 \tag{۴۷}$$

$$y_3 = \delta \theta_o - \delta \theta_c + e_3 \tag{۴۸}$$

اگر روابط مدل خطای سنسورها (روابط (۲۸)، (۲۹)، (۳۰)، (۳۱)، (۳۴)، (۳۵)، (۴۰)، (۴۱)، (۴۲)، (۴۳) و (۴۵)) و مدل اندازه‌گیری سیستم (روابط (۴۶) تا (۴۸)) را بطور یکجا با یکدیگر در نظر بگیریم معادله فضای حالت سیستم به فرم زیر خواهد شد:

$$\dot{\delta X}_t = A(t)\delta X_t + v_t \tag{۴۹}$$

$$Y_t = C\delta X_t + e_t \tag{۵۰}$$

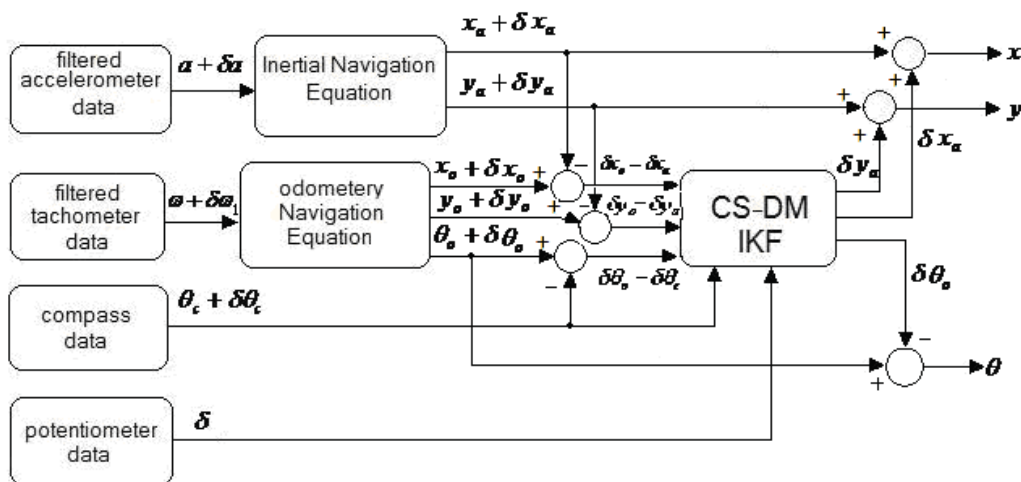
که در این رابطه بردارهای δX_t ، v_t ، Y_t ، e_t و ماتریس‌های $A(t)$ و C بفرم زیر می‌باشند:

$$\delta X_t = [\delta x_o, \delta y_o, \delta \theta_o, \delta \omega_1, \delta x_a, \delta y_a, \delta V_{xa}, \delta V_{ya}, \delta a_x, \delta a_y, \delta \theta_c]^T$$

$$\gamma_t = [0, 0, 0, \omega_o, 0, 0, 0, 0, \omega_{ax}, \omega_{ay}, 0]^T$$

$$e_t = [e_1, e_2, e_3]$$

$$Y_t = [y_1, y_2, y_3]^T$$



شکل ۴: دیاگرام بلوکی ساختار پیشرو فیلتر کالمن غیرمستقیم

$Q_o(t)$ که در زیر آورده شده‌است، در هر لحظه دارای رتبه کامل باشد [۱۷]

$$Q_o^T(t) = [q_0(t); q_1(t); \dots; q_{n-1}(t)] \tag{۵۱}$$

$$q_{k+1}(t) = A^T(t)q_k(t) + \dot{q}_k(t) \tag{۵۲}$$

۴- رؤیت‌پذیری مدل خطای سیستم خودرو چهار چرخ خودگردان

برای پیاده‌سازی فیلتر کالمن لازم است که سیستم مورد نظر رؤیت‌پذیر باشد، یک سیستم، رؤیت‌پذیر حالت است هرگاه ماتریس رؤیت‌پذیری

درواقع $K(t)$ مجموعه ستونهای $p_k(t)$ های تعریف شده- در رابطه (۵۵) می‌باشد. میدانیم که $K(t)$ برای $t \in R$ یک زیرفضا از R^n می‌باشد، اگر $v_1(t), \dots, v_r(t)$ یک پایه برای $K(t)$ باشند، همچنین $w_1(t), \dots, w_{n-r}(t)$ یک پایه برای $K(t)^\perp$ (مجموعه تمام حالات کنترل ناپذیر سیستم) باشند، ماتریس تبدیل $T(t)$ برای تجزیه کنترل پذیر سیستم، از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T(t) = [v_1(t), \dots, v_r(t), w_1(t), \dots, w_{n-r}(t)] \quad (61)$$

برای یافتن $v_1(t), \dots, v_r(t)$ کفایت ستونهای مستقل خطی ماتریس $Q_c(t)$ را بیابیم. پس از تشکیل پایه $v_1(t), \dots, v_r(t)$ برای $K(t)$ ، برای یافتن پایه‌های $w_1(t), \dots, w_{n-r}(t)$ برای فضای متعامد $K(t)^\perp$ ، به این صورت عمل می‌نماییم که بردارهای مستقل خطی ای را می‌یابیم که بر تمامی ستونهای مستقل خطی ماتریس $Q_c(t)$ عمود باشند و در نتیجه یک پایه برای $K(t)^\perp$ محسوب می‌شوند. می‌دانیم که کنترل پذیری و رؤیت پذیری دوگان یکدیگر می‌باشند، در نتیجه برای یافتن ماتریس تبدیل رؤیت پذیری، ابتدا ماتریس رؤیت پذیری $Q_o(t)$ را تشکیل می‌دهیم و سپس سطرهای مستقل خطی آنرا به عنوان v_i ها در نظر می‌گیریم، سپس با روشی که بیان شد، بردارهای مستقل خطی، عمود بر همه پایه‌های به دست آمده، به دست می‌آوریم. در این صورت ماتریسهای سیستم تبدیل یافته، به فرم زیر تبدیل می‌شوند:

$$\bar{A} = T^{-1}A(t)T - T^{-1}\dot{T} = \begin{bmatrix} A_1(t) & 0 \\ A_2(t) & A_3(t) \end{bmatrix} \quad (62)$$

$$\bar{C}(t) = C(t)T = [C_1(t) \quad 0] \quad (63)$$

که جفت $(A_1(t), C_1(t))$ رؤیت پذیر حالت می‌باشند. برای معادلات خودرو، با تعریف $Z = T^{-1}X$ ، مشاهده می‌شود که برای سیستم تبدیل شده، در هر لحظه متغیرهای حالت Z_0, \dots, Z_r ، رؤیت پذیر می‌باشند، همچنین با مشاهداتی که از شبیه سازی سیستم برای مسیرهای مختلف به دست آمده است، مشاهده می‌شود که ماتریس $A_3(t)$ صفر نمی‌باشد. با توجه به مشاهداتی که از ماتریس $T(t)$ داریم متوجه می‌شویم که دو حالت رؤیت ناپذیر تنها بر روی خطای موقعیت در راستای Y تاثیرگذار می‌باشند، لذا قادر خواهیم بود از روی سایر خطاها این دو کمیت را با دقت مطلوب به دست آوریم. با استفاده از روابط موجود بین خطاها که در زیر آورده شده‌اند، با استفاده از متغیرهای $\delta\omega_{ya}$ و $\delta\theta$ ، می‌توان به محاسبه خطای موجود در راستای Y پرداخت.

$$q_0(t) = C^T(t) \quad (53)$$

با بررسی‌های انجام شده برای خودرو، مشاهده می‌شود که رتبه ماتریس رؤیت پذیری در هر لحظه برابر با ۹ می‌باشد، در صورتیکه مرتبه سیستم ۱۱ است، در نتیجه دو متغیر از متغیرهای حالت سیستم رؤیت ناپذیر می‌باشند و ما قادر به استفاده از فیلتر کالمن برای تخمین تمامی حالات سیستم نخواهیم بود، برای حل این مشکل دو راه حل وجود دارد: اضافه کردن اندازه گیری‌های اضافی به سیستم که این امر مستلزم نصب سنسورهای اضافی روی سیستم می‌باشد. یافتن راهی برای رؤیت پذیر کردن سیستم، یا یافتن زیرسیستم رؤیت پذیر سیستم مذکور و یافتن حالات زیر سیستم فوق با استفاده از فیلتر کالمن و محاسبه حالات اصلی از روی حالات به دست آمده. ما از راه دوم برای حل این مشکل استفاده نموده‌ایم، برای یافتن ماتریس تبدیلی که زیر سیستم رؤیت پذیر را برای ما ایجاد نماید، از قضیه تجزیه کنترل پذیری کالمن، که به صورت زیر است و همچنین دوگانی روابط کنترل پذیری و رؤیت پذیری استفاده می‌نماییم.

قضیه تجزیه کنترل پذیری کالمن:

اگر $A(t) \in R^{n \times n}$ و $B(t) \in R^{n \times m}$ باشد و $Q_c(t)$ ماتریس کنترل پذیری سیستم باشد که در (۵۴) تا (۵۶) آورده شده است:

$$Q_c(t) = [p_0(t); p_1(t); \dots; p_{n-1}(t)] \quad (54)$$

$$p_{k+1}(t) = A(t)p_k(t) - \dot{p}_k(t) \quad (55)$$

$$p_0(t) = B(t) \quad (56)$$

و $Rank(Q_c(t)) = r \leq n$ ، آنگاه یک ماتریس معکوس پذیر $T(t) \in R^{n \times n}$ وجود دارد به صورتیکه:

$$\bar{A} = T^{-1}A(t)T - T^{-1}\dot{T} = \begin{bmatrix} A_1(t) & A_2(t) \\ 0 & A_3(t) \end{bmatrix} \quad (57)$$

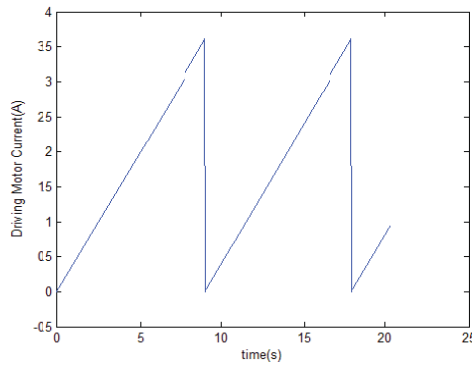
$$\bar{B}(t) = T^{-1}B(t) = \begin{bmatrix} B_1(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (58)$$

که در آن $A_1(t) \in R^{r \times r}$ و $B_1(t) \in R^{r \times m}$ جفت کنترل پذیر می‌باشند. برای به دست آوردن ماتریس $T(t)$ ، ابتدا فضای $K(t)$ را به صورت مجموعه تمام حالات کنترل پذیر سیستم در زمان t معرفی می‌نماییم، به اینصورت که اگر b^j ها را ستونهای ماتریس $B(t)$ در نظر بگیریم، یعنی داشته باشیم:

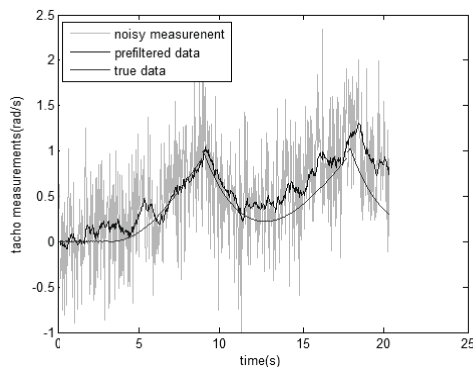
$$B(t) = [b^1(t), \dots, b^m(t)] \quad (59)$$

از رابطه زیر به دست می‌آید:

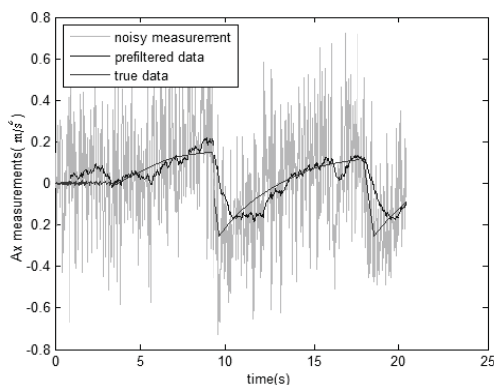
$$K(t) = span_R \left\{ \left(A - \frac{d}{dt} \right)^i b^j : i \in N, j = 1, \dots, m \right\} \quad (60)$$



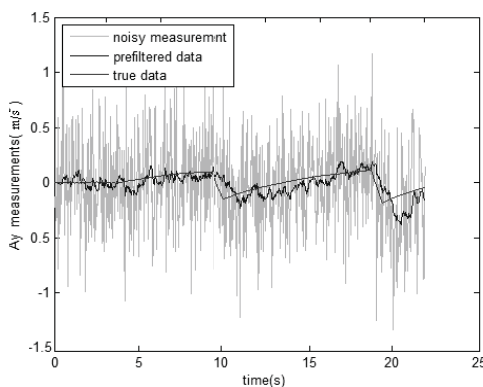
شکل ۶: جریان موتور محرک



شکل ۷: خروجی شبیه‌سازی شده تاکومتر



شکل ۸: خروجی شبیه‌سازی شده شتاب‌سنج راستای X



شکل ۹: خروجی شبیه‌سازی شده شتاب‌سنج راستای Y

$$\dot{\delta} \omega_o = r \left[\left(\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1 \right) \sin \theta + \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \cos \theta \right] \delta \omega_1 \quad (64)$$

$$+ r \omega_1 \left[\left(\cos \delta_1 + \frac{L}{2(a+b)} \sin \delta_1 \right) \cos \theta - \frac{b}{a+b} \sin \delta_1 \sin \theta \right] \delta \theta.$$

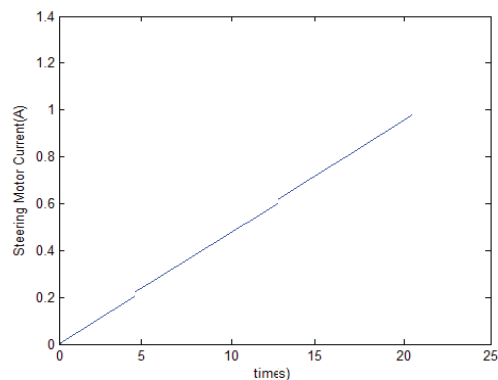
$$\dot{\delta} \gamma_a = \delta V_{ya} \quad (65)$$

از آنجا که ماتریس \bar{C} به‌گونه‌ای است که اندازه‌گیری‌ها برای فیلتر کالمن بکار گرفته شده برای زیرسیستم بدست آمده با اندازه‌گیری‌های سیستم اصلی یکسان می‌باشد، در نتیجه قادر خواهیم بود، متغیرهای Z_1, \dots, Z_9 را با استفاده از فیلتر کالمن تخمین بزنیم و سپس با صفر فرض کردن $A_3(t)$ و با استفاده از رابطه‌ای که به وسیله ماتریس $A_2(t)$ بین Z_{11} و Z_{10} و سایر حالات ایجاد می‌شود، به تقریب هرچند نادرست Z_{11} و Z_{10} بپردازیم. در نهایت به کمک تبدیل معکوس $X = TZ$ متغیرهای حالت اصلی سیستم به دست آورده می‌شوند. در این فرایند مقادیر $\delta \gamma_o$ و $\delta \gamma_a$ صحیح نمی‌باشند، لذا برای یافتن مقادیر صحیح این دو خطا با استفاده از روابط (۶۴) و (۶۵) میتوان به محاسبه مقادیر صحیح پرداخت. در ادامه نتایج شبیه‌سازی آورده شده‌اند که کارآیی روش ارائه شده را نشان می‌دهند.

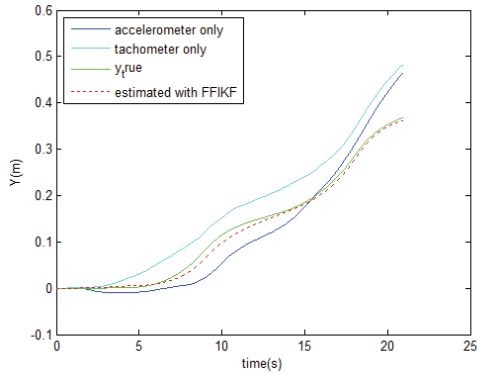
۵- نتایج شبیه‌سازی

با استفاده از مدل سیستم که از شناسایی به دست آمد، خروجی سنسورها در حین حرکت خودرو با ورودی‌های ولتاژ موتورهای محرک و فرمان مختلف، شبیه‌سازی شده و با استفاده از آنها پیاده‌سازی الگوریتم فیلتر کالمن انجام شده است.

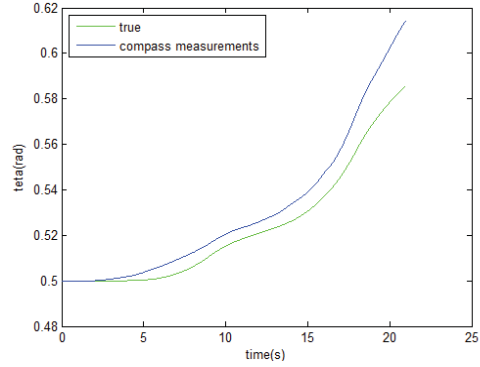
به‌عنوان مثال ورودی ولتاژ موتور محرک، دندانه‌اره‌ای و ورودی ولتاژ موتور فرمان، شیب در نظر گرفته شده است که جریان موتورها در شکل‌های (۵) و (۶) نمایش داده شده‌اند، خروجی شبیه‌سازی شده سنسورها در شکل‌های (۷) تا (۱۰) آورده شده‌اند.



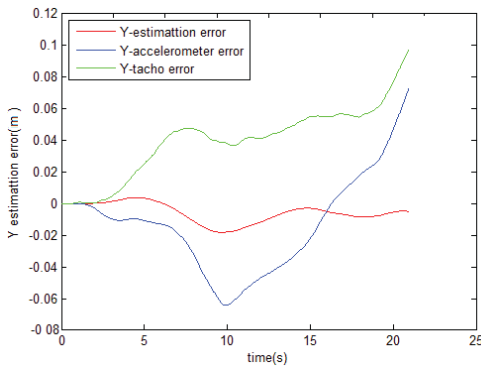
شکل ۵: جریان موتور فرمان



شکل ۱۳: موقعیت در راستای Y

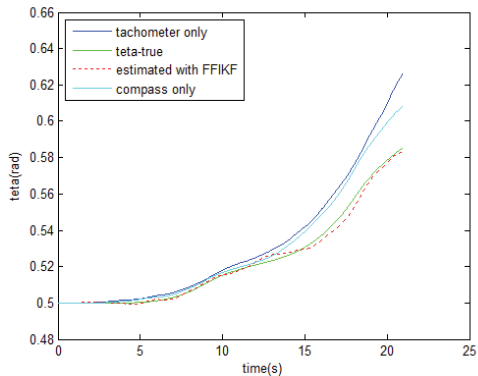


شکل ۱۰: خروجی شبیه‌سازی شده قطب‌نما

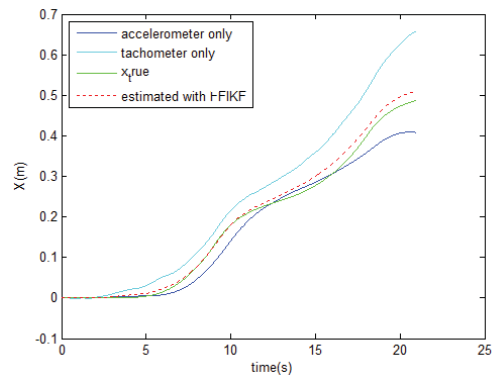


شکل ۱۴: مقایسه خطای موقعیت در راستای Y

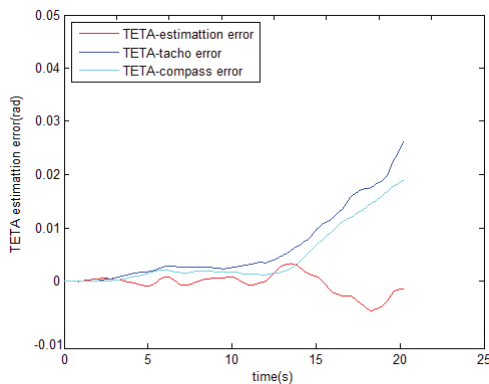
مقایسه موقعیت و زاویه سمت محاسبه شده از داده‌های سنسورها به تنهایی و موقعیت و زاویه سمت تخمین زده شده توسط فیلتر کالمن و موقعیت و زاویه سمت صحیح در شکل‌های (۱۱)، (۱۳) و (۱۵) آورده شده‌اند. همچنین مقایسه خطاهای بین کمیت‌ها برای اندازه‌گیری توسط سنسورها به تنهایی و همجوشی داده‌ها با فیلتر کالمن در شکل‌های (۱۲)، (۱۴) و (۱۶) ارائه شده است.



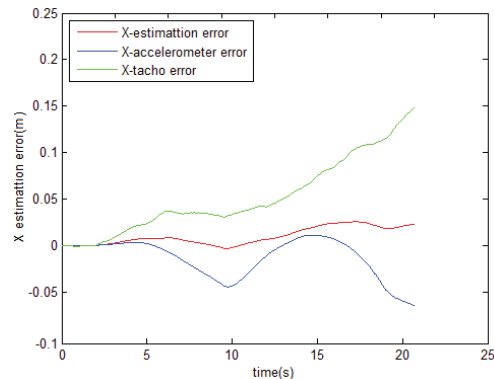
شکل ۱۵: زاویه سمت



شکل ۱۱: موقعیت در راستای X



شکل ۱۶: مقایسه خطای زاویه سمت



شکل ۱۲: مقایسه خطای موقعیت در راستای X

- [2] Chung, H., Ojeda, L. and Borenstein, J., May 2001, "Sensor Fusion for Mobile Robot Dead-reckoning with a Precision-calibrated Fiber Optic Gyroscope", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seoul, Korea, pp. 3588-3593,
- [3] Park, K. and Chung, D., 1996, "Dead Reckoning Navigation of a Mobile Robot Using an Indirect Kalman Filter", *IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, Washington-DC*.
- [4] Tarin, C. and Brugger, H., May 1999, "Low Level Sensor Fusion for Autonomous Mobile Robot Navigation", *IEEE Proceedings of the 16th Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol. 3, Venice, pp. 1377-1382.
- [5] Von der Hardt, H. J. and Wolf, D., Dec. 1996, "The Dead Reckoning Localization System of the Wheeled Mobile Robot ROMANE", *IEEE International Conference on Multisensory Fusion and Integration for Intelligent Systems*, Washington-DC, pp. 603-610.
- [6] Sasiadek, J. Z. and Hartana, P., July 2000, "Sensor Data Fusion Using Kalman Filter", *Proc. Third Int'l Conf. Information Fusion*, vol. 2, pp. WED5/19-WED5/25.
- [7] Marron, M. and Garcia, J. C., 2003 "Fusing Odometric and Vision Data with an EKF to Estimate the Absolute Position of an Autonomous Mobile Robot", *IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, vol. 1, pp. 591-596.
- [8] Alessandri, A. and Bartolini, G., June 1997, "An Application of The Extended Kalman Filter for Integrated Navigation in Mobile Robotics", *Proceeding of the American Control Conference*, Albuquerque, New Mexico.
- [9] Goel, P. and Stergios and Roumeliotis, I., 1999, "Robot Localization Using Relative and Absolute Position Estimates", *Department of Computer Science Institute for Robotics and Intelligent Systems, University of Southern California, Los Angeles, CA 90089-078*.
- [10] Tarin Sauer, C. and Brugger, H., May 21-23, 2001, "Odometer Error Correction by Sensor Fusion for Autonomous Mobile Robot Navigation", *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Budapest, Hungary.
- [11] Barshan, B. and Durrant-Whyte, F., July 26-30, 1993, "An Inertial Navigation System for a Mobile Robot", *IEEE International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Yokohama, Japan.
- [12] Vaganay, J. and Aldon, M. J., May 1993, "Mobile Robot Attitude Estimation by Fusion of Inertial

همانطور که در شکلها مشاهده می‌شود، خطای تخمین موقعیت توسط فیلترکالمن در راستای X کمتر از 0.04 متر و در راستای Y کمتر از 0.02 متر می‌باشد، این در حالیست که خطای محاسبه موقعیت از داده‌های شتاب‌سنج، افزایشی و در مدت زمان حدود 20 ثانیه در راستای X حدود 0.1 متر و در راستای Y نیز حدود 0.1 متر می‌باشد. همچنین خطای محاسبه موقعیت از داده‌های تاکومتر نیز افزایشی و در مدت زمان حدود 20 ثانیه در راستای X حدود 0.15 متر و در راستای Y نیز حدود 0.12 متر می‌باشد.

خطای تخمین زاویه سمت توسط فیلترکالمن حدود 0.005 رادیان می‌باشد، این در حالیست که خطای اندازه‌گیری قطب‌نما افزایشی و در 20 ثانیه حدود 0.02 رادیان و همچنین خطای محاسبه زاویه سمت از داده‌های تاکومتر نیز افزایشی و در حدود 0.04 رادیان در 20 ثانیه می‌باشد. نتیجتاً با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها مشاهده می‌شود که الگوریتم فیلتر کالمن پیشنهادی در کاهش خطای موقعیت‌یابی موثر و کارآمد می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در موقعیت‌یابی خودرو، هدف، یافتن موقعیت دقیق وسیله نقلیه با وجود عدم دقت در اندازه‌گیری‌های سنسورها می‌باشد. در این مقاله الگوریتم فیلترکالمن غیرمستقیم با ساختار پیشرو برای یافتن موقعیت دقیق خودرو، شبیه‌سازی شده‌است که از قسمت‌های مهم آن یافتن راه‌حل جدیدی برای بکارگیری فیلترکالمن در سیستم‌های رؤیت‌ناپذیر می‌باشد. همچنین راه‌حلی برای یافتن ماتریس‌های کوواریانس نوز فرایند و اندازه‌گیری ارائه شده‌است که در پیاده‌سازی عملی مفید خواهد بود. شناسایی سیستم با اعمال ورودیهای مختلف به موتورها، انجام شده‌است و پارامترهای خودرو پارامترهای موتورها با دقت مناسبی شناسایی شده‌اند.

خروجی شتاب‌سنج هم دارای نویز و هم دارای بایاس تصادفی می‌باشد، که با استفاده از فیلترکالمن غیرمستقیم، بایاس تصادفی، حذف و با استفاده از فیلترکالمن مستقیم، دقت اندازه‌گیری شتاب‌سنج افزایش یافته‌است. در نهایت پیاده‌سازی فیلترکالمن غیرمستقیم، در شبیه‌سازی‌ها، به نحو مطلوبی داده‌است.

مراجع

- [1] Zunaidi, I., Kato, N., 2006, "Position System for 4-wheel Mobile Robot: Encoder, Gyro and Accelerometer Data Fusion with Error Model Method", *CMU Journal*, Vol. 5 (1).

- [16] Olsson, H., *Control Systems with Friction*, PhD Dissertation, Lund institute of Technology, 1996.
- [17] Berhanu Bekele, Belayneh., 2007, "time varying linear systems", M.S. Thesis, RWTH University, Akhen, Germany.
- [۱۸] امینیان، آمنه، "موقعیت‌یابی خودرو چهارچرخ خودگردان با بکارگیری همجوشی داده‌ها"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، شیراز. دانشگاه شیراز. بخش برق و الکترونیک، شهریورماه ۸۷.
- Data", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Atlanta, GA, vol.1, pp.277-282.
- [13] Tsai, C., October 1998, "A Localization System of a Mobile Robot by Fusing Dead-Reckoning and Ultrasonic Measurements", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.47, NO.5.
- [14] Javid, S., March 2002, "Dynamic Based Motion Control of a Four Wheel Autonomous Ground Vehicle", M.S. Thesis, Shiraz: Shiraz University.
- [15] Armstrong, B. and Helouvry, *Control of Machines with Friction*, Kluwer Academic publishers, 1991.