بررسي آزمايشگاهي توانايي حسگرهاي فراصوتي در تعيين جهت و موقعيت روبات هاي متحرک براي کاربردهاي گلخانه‌اي

حسن مسعودي*[۱]، محمود اميد[۲]، رضا عليمرداني[۳]، سيدسعيد محتسبي[۴] و سعيد باقري شوركي [۵]
[۱]، دانشجوي دكتري، [۲]، [۳]، دانشيار، و [۴]، استاد، گروه مهندسي مكانيك ماشين‌هاي كشاورزي، دانشگاه تهران
[۵]، دانشيار دانشكده مهندسي كامپيوتر دانشگاه صنعتي شريف
(تاريخ دريافت: ۱۳۸۷/۱۰/۳۰ - تاريخ تصويب: ۱۳۸۸/۹/۲۹)

چكيده

در سال‌هاي اخير تحقيقات زيادي براي ساخت روبات‌هايي براي انجام عمليات مختلف در بخش كشاورزي در حال انجام است. يكي از مراحل اصلي براي ساخت روبات‌هاي كشاورزي چگونگي توليد سيگنال‌هاي هادي است. هدف از انجام اين تحقيق بررسي امكان استفاده از حسگرهاي فراصوتي USS3 در تعيين جهت و موقعيت يک وسيله نقليه متحرک به منظور استفاده در ساخت يک روبات متحرک براي كاربردهاي گلخانه‌اي است. بدين منظور آزمايشاتي براي ارزيابي ميزان دقت حسگرهاي فراصوتي منتخب در تعيين جهت و موقعيت و نيز يافتن بهترين چيدمان حسگرها در اطراف شاسي روبات انجام شد. نتايج آزمايشات نشان داد كه مي‌توان حسگرهاي فراصوتي USS3 را براي توليد سيگنال هاي هادي روبات در محيط گلخانه ها بكار برد. بهترين فاصله قابل رويت اين حسگرها براي به كارگيري در اين شرايط ۱۵ تا ۲۰۰ سانتي متر است. در فواصل كمتر از ۱۵ سانتي متر و زواياي بيشتر از ۳۰ درجه حسگرها دقت خوبي ندارند. حداكثر عرض ناحيه ديد حسگرها براي سطوح صاف ۱۷/۱۵ سانتي متر و براي سطوح مدور ۳۳/۲۰ سانتي متر به دست آمد. چيدمان نهايي حسگرها در اطراف شاسي روبات نيز تعيين شد. همچنين نتايج آزمايشات نشان داد كه با الگوريتم ميانگين گيري طراحي شده مي توان مقدار موقعيت و جهت را از داده هاي اصلاح شده حسگرهاي فراصوتي محاسبه نمود. حداكثر مقدار اختلاف بين مقادير موقعيت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي با مقادير حسگر مرجع ۳ سانتي‌متر و مقدار RMSE آنها ۰/۷۱۴ سانتي متر بود. همچنين حداكثر مقدار اختلاف بين مقادير جهت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي با مقادير حسگر مرجع ۱۱/۲۳ درجه و مقدار RMSE آنها ۴/۰۳۶ درجه به دست آمد.

واژه‌هاي كليدي: فاصله، زاويه، ناحيه ديد، فيلتر ميانه، ميانگين گيري.

مقدمه

امروزه اتوماسيون در تمامي بخش‌هاي توليدي رو به گسترش است و بخش كشاورزي هم از اين قاعده مستثني نيست. علم روباتيك نيز به عنوان بخشي از اين اتوماسيون توسعه فراواني يافته است. در سال‌هاي اخير تحقيقات زيادي به منظور ساخت روبات‌هايي براي انجام عمليات مختلف در بخش كشاورزي در حال انجام است. با به كارگيري اين روبات‌ها در بخش كشاورزي از شدت كارهاي سخت، خطر زا، طاقت فرسا و طولاني كاسته خواهد شد و بر كيفيت و كميت فرآورده‌هاي اين بخش افزوده خواهد شد.

لزوم صرفه‌جويي در هزينه‌ها و نيروي انساني و تقاضا براي توليد بيشتر در واحد سطح، استفاده از فناوري هاي نوين را در گلخانه‌ها نيز اجتناب‌ناپذير نموده است. با پيشرفت روزافزون فناوري و پائين آمدن هزينه‌هاي توليد محصولات گلخانه اي با استفاده از فناوري‌هاي جديد، چشم انداز دستيابي به ماشيني شدن پيچيده و پيشرفته در گلخانه‌ها واقع گرايانه‌تر مي‌شود. حضور وسايل نقليه كاملاً خودكار و روبات‌هايي خودمختار[1] كه آزادانه بدون ريل‌هاي مزاحم به كمك سيستم‌هاي مدرن روي زمين حركت مي‌كنند، فناوري پيشرفته گلخانه‌ها در قرن بيست و يكم خواهد بود(Shariati, 2004) .

در سال‌هاي اخير محققان زيادي در نوشته‌هاي خود كاربرد وسايل نقليه خودكار را در كشاورزي گزارش كرده‌اند. Cho & Ki (۱۹۹۹) سيستم‌هاي كنترل فازي و ماشين بينايي را براي يک سمپاش سريع باغي استفاده كردند. اطلاعات ورودي به كنترل كننده فازي از دو منبع حسگرهاي ماشين بينايي و فراصوتي فراهم مي‌شدند. براي حركت وسيله نقليه از تصاوير ماشين بينايي استفاده مي شد، در حاليكه داده فاصله بين جسم

* نويسنده مسئول: hmasoodi@ut.ac.ir

1. Autonomous

و سمپاش با استفاده از حسگرهاي فراصوتي به دست مي‌آمد. Shin & Kim (۲۰۰۱) سيستم هدايت خودكار براي يک سمپاش كوچک باغي را با به كارگيري راهنماي فلزي در طول مسير (لوله استيل ضدزنگ) براي انعكاس امواج فراصوتي به سمت حسگرهاي فراصوتي توسعه دادند. Singh et al. (۲۰۰۵) يک وسيله نقليه شش چرخ با فرمان‌گيري ديفرانسيلي ساختند كه به عنوان سمپاش گلخانه‌اي عمل مي‌كرد. اين روبات سمپاش با موفقيت در راهروهايي با پهناي ۴۵/۷، ۵۰/۸ و ۶۱/۰ سانتي‌متر هدايت شد. در ايران تحقيقات اندكي در زمينه هدايت خودكار ماشين‌هاي كشاورزي انجام شده است. Karparvar Fard (۱۹۹۰) و Bayati (۱۹۹۴) در تحقيقات خود سيستم خود تراز روي تراكتور را طراحي و ساختند كه مي‌توانست تراكتور را بر روي خطوط تراز در يک سطح شيب دار هدايت نمايد. Alimardani et al. (۱۹۹۴) در تحقيقي سيستم كنترل راديويي را بر روي يک دستگاه تراكتور باغي كوچک نصب نمودند كه تا شعاع ۱۰۰۰ متر از راه دور قابل كنترل بود. Seidi (۲۰۰۵) در مطالعه‌اي به امكان سنجي به كارگيري سيستم فرمان‌گيري خودكار در تراكتورهاي رايج در ايران با استفاده از فناوري مناسب پرداخت. اين سيستم از نوع "هدايت وسيله بر اساس خطوط راهنما و ايجاد خط هادي با استفاده از تماس مكانيكي" استوار بود. Aghkhani & Abbaspour Fard (۲۰۰۹) سيستم هدايت خودكار تراكتورهاي كشاورزي با استفاده از يک كابل مرئي را ساختند. در سيستم ايشان ابتدا يک كابل فولادي حاوي جريان الكتريكي ضعيف بر روي مسير حركت مطلوب و بر روي سطح خاک قرار داده مي‌شد. سيستم هدايت خودكار طراحي شده درحين حركت رو به جلوي تراكتور، ميزان انحراف خط مركزي تراكتور از كابل فولادي را توسط يک چرخ پنجم با ديسک‌هاي فولادي حاوي جريان الكتريكي حس نموده و انحراف تراكتور از راستاي حركت را به صورت خودكار اصلاح مي‌نمود.

اصولاً طراحي سيستم‌هاي هدايت خودكار شامل دو مرحله اصلي است: چگونگي توليد سيگنال‌هاي هادي و طراحي كنترل كننده (Tillett, 1991). هنگامي كه يك وسيله به صورت دستي هدايت مي‌گردد، راننده مرتباً مسير حركت واقعي را مي‌بيند و آن را با مسير مطلوب از پيش تعريف شده مقايسه مي‌كند، تا هرگونه انحراف از مسير را تصحيح كند. براي جايگزيني يك سيستم هدايت خودكار به جاي راننده نيز اين حلقه بسته كه شامل عمليات "سنجش، مقايسه و اصلاح" است، بايد اجرا گردد. هرچند كه تا به حال هيچ سيستم هدايت ايده‌آلي براي ماشين‌هاي كشاورزي فراهم نشده است، با اين وجود روش‌هاي فراواني كه برحسب نحوة به دست آمدن سيگنال‌هاي هادي (هدايت كننده) از مزرعه تقسيم‌بندي مي‌گردند، توسعه يافته‌اند. در حال حاضر توليد سيگنال‌هاي هادي براي هدايت خودكار ماشين‌هاي كشاورزي با استفاده از روش‌هاي مختلفي امكان‌پذير است كه برخي از مهمترين آنها عبارتند از(Seidi, 2005) :

۱- هدايت غيرمستقيم توسط انسان
۲- هدايت نيمه اتوماتيك وسيله با كمك راننده
۳- هدايت وسيله بر اساس خطوط راهنما
۴- تخمين مسافت[1]
۵- سيستم هاي ماشين بينايي[2]
۶- هدايت به كمک سيستم موقعيت ياب جهاني[3]

در هر پروژه‌اي با توجه به اهداف از پيش تعيين شده، شرايط و امكانات موجود، ممكن است يک يا چند تا از اين روش‌ها استفاده شود. استفاده تركيبي يا تلفيقي از چند روش باعث افزايش دقت و كارآيي سيستم خواهد شد. مثلاً در يک گلخانه از آنجائي كه امروزه اغلب توليدكنندگان، محصولات گلخانه‌اي را روي كف گلخانه پرورش نمي‌دهند، بلكه از ميزها، چهارچوب‌ها و يا سكوهاي مخصوص گلدان استفاده مي‌كنند تا دسترسي كارگران در مراحل مختلف توليد راحت‌تر باشد. مي‌توان از لبه اين ميزها، چهارچوب‌ها و يا سكوها به عنوان خطوط راهنما براي هدايت خودكار روبات‌هاي گلخانه‌اي استفاده نمود.

هدف اصلي از اين تحقيق بررسي امكان استفاده از حسگرهاي فراصوتي براي توليد سيگنال‌هاي هادي روبات‌هاي گلخانه‌اي است. بدين منظور دقت يک مدل خاص از اين نوع حسگر در تعيين فاصله و زاويه ارزيابي شده و قابليت آن در تعيين جهت[4] و موقعيت[5] يک وسيله نقليه كوچک در درون راهرو بررسي مي‌گردد. در نهايت از نتايج به دست آمده در طراحي بهينه يک روبات گلخانه‌اي و يافتن بهترين چيدمان حسگرها در اطراف روبات مورد نظر استفاده شد.

مواد و روش ها

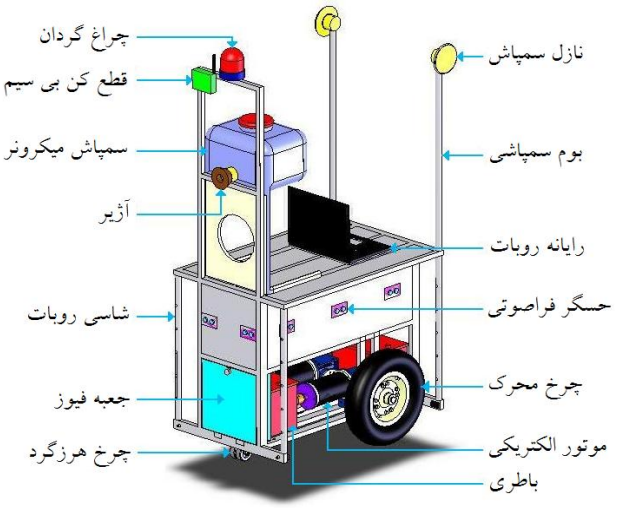
از آنجايي كه نتايج اين تحقيق در طراحي بهينه و ساخت يک روبات گلخانه‌اي استفاده خواهند شد، لذا پيش از شرح مشخصات حسگرهاي فراصوتي منتخب و آزمايشات انجام شده

1. Dead Reckoning
2. Machine Vision
3. Global Positioning System(GPS)
4. Orientation
5. Position

براي ارزيابي عملكرد آنها، ابتدا توضيحاتي درباره روبات مدنظر و نحوه هدايت آن در درون گلخانه داده مي شود.

روبات طراحي شده

شكل۱ نماي سه بعدي رايانه‌اي روبات گلخانه اي طراحي شده را نشان مي‌دهد كه يک روبات متحرک[1] سه چرخ با دو چرخ محرک بزرگ در قسمت عقب روبات و يک چرخ هرزگرد كوچک در قسمت جلوي آن است. اين روبات توانايي آن را خواهد داشت كه در درون راهروهاي گلخانه حركت نموده و عمليات كشاورزي موردنظر را انجام دهد و با رسيدن به انتهاي راهرو دور زده و به راهروي بعدي برود. اين روبات از دو طريق براي توليد سيگنال‌هاي هادي استفاده خواهد كرد. در بين رديف‌هاي محصول از حسگرهاي فراصوتي[2] نصب شده در سمت راست و چپ روبات و در خارج از رديف محصول‌ها و نيز انتهاي رديف‌ها براي دور زدن از روش تخمين مسافت استفاده خواهد كرد. حسگرهاي فراصوتي نصب شده در قسمت جلو و عقب روبات نيز براي تشخيص مانع به كار خواهند رفت. مزيت‌هاي استفاده از حسگرهاي فراصوتي كار در هر شرايط نوري، زمان پاسخ سريع و قيمت نسبتاً ارزان آنها نسبت به ساير حسگرها (همچون دوربينCCD، حسگرهاي ليزري و رادارها) است (Gray, 2000).



شكل۱- نماي سه بعدي رايانه اي روبات گلخانه اي طراحي شده

نحوه هدايت خودكار روبات

اين روبات بايستي بتواند در درون گلخانه، راهروي بين دو رديف گلدان‌ها را تشخيص داده و در آن حركت كند. در گلخانه‌هايي كه از يک سكو يا ميز و يا پايه‌هاي فلزي براي نگهداري گلدان‌ها استفاده مي‌شود مي‌توان از لبه آنها به عنوان خطوط هادي روبات بهره برد. براي اين كار خط مركزي راهرو كه به موازات رديف گلدان‌هاست به عنوان خط هدف يا مسير حركت در نظر گرفته مي‌شود (شكل۲-چپ). روبات بايستي به گونه‌اي كنترل شود كه همواره بر روي خط هدف قرار داشته باشد. براي تحقق اين هدف، الگوريتم هدايت خودكار روبات به گونه اي طراحي شده است كه به صورت زير عمل خواهد كرد:

۱- لبه سكو يا ميز يا پايه‌هاي فلزي گلدان‌ها به عنوان خطوط هادي درنظر گرفته مي شوند.

۲- در هر لحظه فاصله هريک از حسگرهاي فراصوتي نصب شده در دو سمت چپ و راست روبات تا خطوط هادي تعيين مي‌شود.

۳- موقعيت و جهت روبات از تركيب داده‌هاي حسگرهاي فراصوتي به دست مي آيد.

۴- هدايت خودكار روبات با اصلاح مقادير خطا در موقعيت و جهت روبات صورت مي‌گيرد.

با توجه به شكل (۲-راست) با داشتن مقادير لحظه‌اي جهت و موقعيت روبات مي‌توان مقدار زاويه فرمانگيري[3] آن را از رابطه(۱) به دست آورد(Barawid et al., 2007):

(۱)

$$\varphi = (\theta + \tan^{-1}(\frac{e}{l})) \rightarrow \alpha = \tan^{-1}(\frac{e}{l}) \;\&\; \phi = -(\theta + \alpha)$$

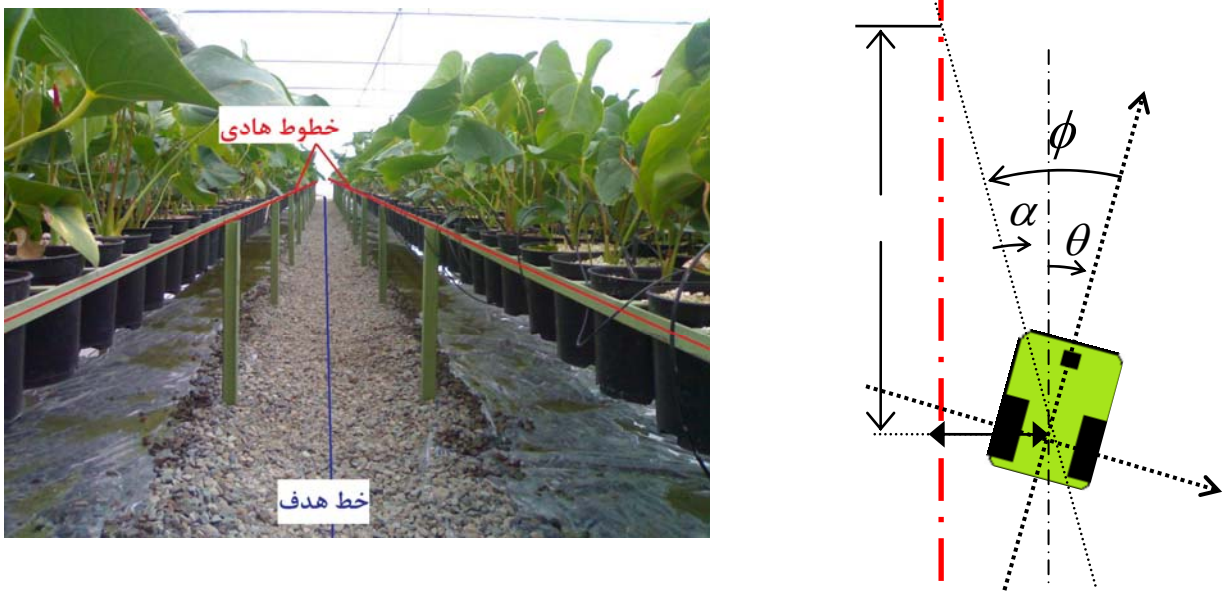
كه در اين رابطه، ϕ زاويه فرمانگيري (درجه)، θ انحراف زاويه اي (درجه)، e انحراف جانبي (سانتي متر)، و l فاصله رو به جلو[4] (در اينجا ۱۰۰ سانتي‌متر) است. مقادير ولتاژهاي موتورهاي سمت چپ (V_L) و راست (V_R) تعبيه شده در روبات نيز تابعي از مقدار زاويه فرمان‌گيري مي‌باشند ($V_{R,L} \propto f(\phi)$). لذا مي‌توان مقادير ولتاژ مورد نياز براي هر دو موتور در وضعيت‌هاي مختلف را به دست آورده و با استفاده از آنها روبات را در طول خط هدف (در اينجا خط مركزي راهرو) هدايت نمود.

حسگرهاي فراصوتي منتخب

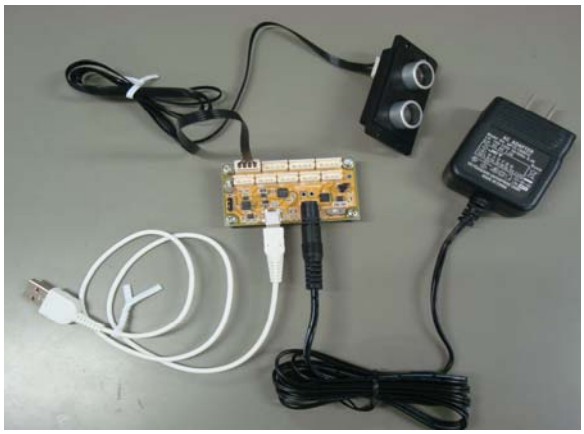
براي انجام آزمايشات پايه ۱۴ عدد حسگر فراصوتي مدل USS3 ساخت شركت Best Technology كشور ژاپن(شكل۳) كه مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است، استفاده شد. اين حسگر از دو عدد سونار[5] (وسيله‌اي كه مي‌تواند پالس‌هاي الكتريكي را به صوت و امواج صوتي را به پالس‌هاي الكتريكي تبديل كند) تشكيل شده است كه روي يک بورد الكترونيكي شامل مدارات فرستنده و گيرنده امواج فراصوتي نصب شده‌اند. يكي از اين سونارها براي فرستادن امواج فراصوتي و ديگري براي

1. Mobile Robot
2. Ultrasonic Range Finder
3. Steering angle
4. Look ahead distance
5. Sonar

دريافت آنها استفاده مي‌شود. اين حسگر با توليد امواج فراصوتي، انتشار و دريافت انعكاس آنها پس از برخورد با يک سطح، فاصله را اندازه‌گيري مي‌كند كه جنس سطح تاثيري بر دقت اندازه‌گيري ندارد. اين حسگر داراي دو نوع خروجي است، يكي خروجي ديجيتالي كه مقدار آن فاصله حسگر تا نزديكترين جسم برحسب سانتي‌متر (با دقت ۱ سانتي‌متر) و ديگري خروجي آنالوگ كه ولتاژي متناسب با فاصله است و به صورت خطي از صفر تا۱۰ ولت (براي صفر تا ۱۰ متر) تغيير مي كند. در اين پروژه از خروجي ديجيتال حسگر استفاده شد.



شكل۲- نمايش خطوط هادي و خط هدف در يک گلخانه پرورش گل(چپ) و نمايش پارامترهاي جهت(**θ**) و موقعيت(**e**) روبات نسبت به خط هدف(راست)(**Barawid et al., 2007**)



شكل۳- حسگر فراصوتي **USS3** به همراه بورد رابط آن

اين مدل حسگر داراي دامنه كاري وسيعي از ٤ تا ۱۰۰۰ سانتي‌متر مي‌باشد كه با توجه به شرايط كاري و فاصله مورد نياز بايد مقادير پارامترهاي داخلي آن تعيين و در ابتدا تنظيم شود. مي‌توان حداكثر ۲۵۴ عدد از اين حسگرها را به صورت موازي به يكديگر وصل كرده و از طريق يک بورد رابط[1] به رايانه متصل نمود(Best Technology Company, 2008). با توجه به اينكه عرض راهروهاي رايج در گلخانه‌ها از ۴۰ تا ۲۰۰ سانتي‌متر است، در نتيجه مقادير پارامترهاي داخلي حسگرها براي تشخيص اجسام در فاصله ۱۵ تا ۲۵۰ سانتي متر تنظيم شد.

آزمايش هاي انجام شده

ابتدا دو سري آزمايش براي ارزيابي ميزان دقت حسگرهاي فراصوتي منتخب و همچنين يافتن بهترين چيدمان حسگرها در اطراف شاسي روبات و سپس يک سري آزمايش ديگر براي ارزيابي توانايي اين حسگرها در تعيين مقادير جهت و موقعيت روبات در سال ۲۰۰۸ ميلادي در آزمايشگاه Vehicle Robotics دانشگاه هوكايدو در كشور ژاپن به شرح زير انجام شد.

آزمايش اول: بررسي ميزان خطاي حسگرهاي فراصوتي**USS3** در تعيين فاصله و زاويه تا ديواره

هدف از انجام اين آزمايش بررسي مقدار خطاي حسگرهاي فراصوتي در تعيين فواصل از ديواره با زواياي مختلف و نيز تعيين زوايا از ديواره با فواصل مختلف بود. تجهيزات مورد استفاده در اين آزمايش عبارت بودند از يک رايانه كيفي، دو حسگر فراصوتي USS3، يک بورد رابط حسگر فراصوتي با رايانه،

1. USS3 Configurator

يک حسگر فاصله ياب ليزري محوري[۱۳] و يک ارابه دستي. براي انجام آزمايش ابتدا برنامه موردنياز براي اخذ داده از حسگرهاي فراصوتي با استفاده از زبان برنامه نويسي C++ و در محيط نرم افزار Visual Studio 2008 نوشته شد. دو عدد حسگر فراصوتي بر روي يک ارابه دستي نصب شده و از طريق بورد رابط به رايانه متصل شدند. با تغيير فاصله حسگرهاي فراصوتي از ديواره عمودي (به طول ۴ متر و ارتفاع ۳ متر) در فواصل ۱۵ تا ۲۵۰ سانتي‌متري و در زواياي ۰ تا ۹۰ درجه، خروجي هر دو حسگر براي تحليل‌هاي بعدي در رايانه ذخيره شد. هم زمان فاصله دقيق هر حسگر تا ديواره با استفاده از حسگر فاصله ياب ليزري محوري (Disto pro4a, Leica Geosystems Co.) با دقت ۱ ميلي متر اندازه گيري شد.

13. Axial laser range finder

جدول ۱- مشخصات حسگرهاي فراصوتي **USS3**

رديف	مشخصه	مقدار
۱	فركانس تشديد[۱۴]	۴۰ كيلوهرتز
۲	سيكل اندازه گيري	۳ تا ۱۲۸ ميلي ثانيه
۳	رزولوشن يا قدرت تفكيک	۱ سانتي متر
۴	حداكثر فاصله اندازه گيري	۱۰ متر(اسمي)
۵	نوع سيگنال فرمان	بسته ديجيتالي[۱۵]
۸	نوع خروجي	ديجيتال (سريال آسنكرون) و آنالوگ (ولتاژ)
۹	نحوه اتصال حسگرها	پروتكل RS485

14. Response frequency
15. Digital packet

آزمايش دوم : تعيين ناحيه ديد[۱۶] واقعي حسگرهاي فراصوتي **USS3**

براي تعيين چيدمان حسگرهاي فراصوتي در اطراف روبات بايستي ناحيه ديد هر يک از حسگرهاي فراصوتي مشخص باشد و حسگرها به گونه اي قرار گيرند كه اطراف روبات را كاملاً پوشش دهند. لذا اين آزمايش با هدف تعيين ناحيه ديد حسگرهاي فراصوتي طرح ريزي شد. در اين آزمايش يک عدد حسگر فراصوتي بر روي پايه فلزي نصب شد. يک عدد كاغذ شطرنجي بزرگ در ابعاد ۲۰۰×۱۰۰سانتي‌متر با خانه‌هايي به ابعاد ۱۰×۱۰ سانتي‌متر در زير و جلوي حسگر پهن شد. دو عدد جسم جامد از جنس پلاستيک با سطوح تخت و مدور (انحناءدار) در جلوي اين حسگر در فاصله ۱۰ تا ۲۵۰ سانتي‌متر و در داخل خانه‌هاي شطرنجي با فواصل ۱۰ سانتي‌متري قرار داده شد و در هر نقطه ديده شدن جسم توسط حسگر بررسي شد و در پايان ناحيه ديد واقعي حسگر با استفاده از نرم افزار Solid Works 2003 ترسيم گرديد.

آزمايش سوم: بررسي توانايي حسگرهاي فراصوتي در تعيين مقادير جهت و موقعيت روبات

براي انجام اين آزمايش ابتدا برنامه رايانه‌اي مورد نياز براي اجراي الگوريتم‌هاي اخذ داده از حسگرهاي فراصوتي، حذف نويز از داده‌ها و تركيب داده‌هاي تمامي حسگرها و محاسبه مقادير جهت و موقعيت به زبان C++ و در محيط نرم افزار Visual Studio 2008 نوشته شد. مطابق شكل (۴) يک راهروي مصنوعي با ديواره هايي از جنس چوب و به عرض ۱۱۵ سانتي‌متر ساخته شد. تعداد ۱۴ عدد حسگر فراصوتي USS3 به صورت موازي به يكديگر متصل شده و بر روي شاسي موقت نصب شدند (۴ عدد در سمت راست، ۴ عدد در سمت چپ، ۳ عدد در جلو و ۳ عدد در عقب). حسگرها از طريق بورد رابط به درگاه USB رايانه كيفي متصل شدند. با هل دادن ارابه توسط يک نفر با سرعت پيشروي تقريبي ۳۰ سانتي‌متر بر ثانيه در مسيرهايي با شكل‌هاي مختلف (۳۰ تكرار) در درون راهروي ساخته شده، مقادير خروجي هر يک از حسگرها در هر لحظه كه فاصله آنها از ديواره كناري بود، در حافظه رايانه ثبت شد. پس از پايان آزمايشات مقادير جهت و موقعيت ارابه در درون راهرو در هر لحظه از روي مقادير حسگرهاي نصب شده در سمت راست و چپ ارابه و با استفاده از روش ميانگين گيري محاسبه شد.

براي ارزيابي دقت مقادير جهت و موقعيت به دست آمده از خروجي حسگرهاي فراصوتي، از دو حسگر به عنوان مرجع مقايسه استفاده شد و در طي انجام آزمايشات داده‌هاي اين حسگرها نيز ثبت گرديد. از يک عدد ژيروسكوپ فيبر نوري[۱۷] مدل JG-35FD با انحراف زاويه ۰/۵ درجه در ساعت به عنوان

16. Detection area

17. Fiber optic gyroscope(FOG)

حسگر مرجع زاويه و از يک دوربين مساحي خودکار[18] مدل Topcon AP-L1A با دقت ۱ ميلي متر که قادر به تعقيب هدف در مسير حرکتش بود، به عنوان حسگر مرجع موقعيت استفاده شد. حسگر مرجع زاويه بر روي ارابه و حسگر مرجع موقعيت در گوشه سالن آزمايش و در مرکز مختصات کلي فرض شده، قرار داده شد.

شکل۴- آزمايش تعيين مقادير جهت و موقعيت با استفاده از حسگرهاي فراصوتي

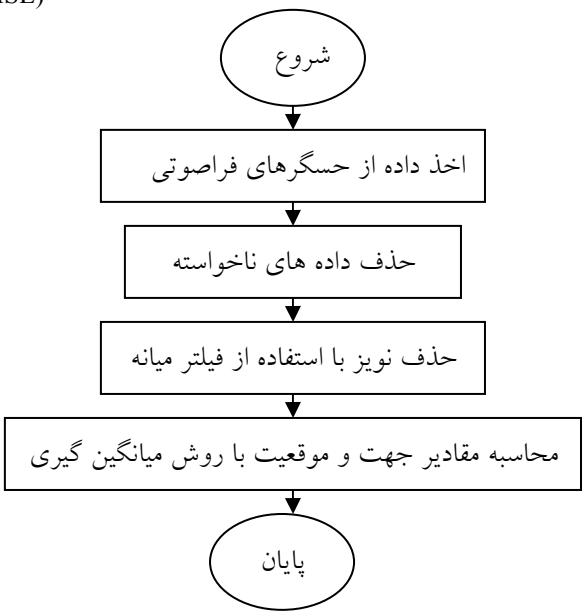
شکل (۵) مراحل مختلف الگوريتم تعيين مقادير جهت و موقعيت ارابه از داده‌هاي حسگرهاي فراصوتي را نشان مي‌دهد. از آنجائيکه نويزهاي موجود در خروجي حسگرهاي فراصوتي از نوع لحظه‌اي و غيريکنواخت (تصادفي) مي‌باشند، لذا از يک فيلتر نرم‌افزاري به نام "فيلتر ميانه[19] " که اين گونه نويزها را به خوبي حذف مي‌کند استفاده شد. روش عملکرد اين فيلتر به گونه‌اي است که در هر لحظه از بين تعداد مشخصي داده رسيده، ميانه آنها را به عنوان مقدار خروجي حسگر در آن لحظه انتخاب مي‌کند. در اين الگوريتم براي ترکيب داده‌هاي حسگرهاي مختلف و تعيين مقادير جهت و موقعيت ارابه از روش ميانگين‌گيري[20] استفاده شد. براي مقايسه مقادير جهت و موقعيت به دست آمده از خروجي حسگرهاي فراصوتي با مقادير حسگرهاي مرجع از شاخص آماري خطاي مربع ميانگين ريشه‌ها[21] (RMSE) استفاده شد که از رابطه زير به دست مي‌آيد:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{e_i^2}{n}} \qquad (۲)$$

در اين رابطه e مقدار انحراف جانبي ارابه از خط مرکزي راهرو در هر نقطه (در واقع همان مقدار موقعيت ارابه بر حسب سانتي‌متر) و n تعداد نقاط داده برداري شده در طول مسير حرکت ارابه است(Cho & Ki, 1999; Singh et al., 2005).

18. Robotic total station

19. Median filter
20. Averaging method
21. Root Mean Square Error (RMSE)



شکل۵- مراحل مختلف الگوريتم تعيين مقادير جهت و موقعيت از روي خروجي حسگرهاي فراصوتي

نتايج و بحث

نتايج به دست آمده از آزمايش اول به منظور بررسي امکان به کارگيري حسگرهاي فراصوتي در تعيين دقيق فاصله از ديواره با زواياي مختلف در جدول (۲) آمده است. با توجه به اين نتايج ديده مي‌شود که براي حصول دقت بالا در تعيين فاصله روبات تا اجسام با استفاده از حسگرهاي فراصوتي USS3 فاصله بين اين حسگرها و اجسام بايستي بيشتر از ۱۵ سانتي متر باشد. همچنين حداکثر زاويه چرخش روبات که حسگرها قادر به تشخيص اجسام هستند ۱۰ درجه است، لذا روبات نبايد بيشتر از ۱۰ درجه چرخش داشته باشد. بهترين و کامل‌ترين تشخيص

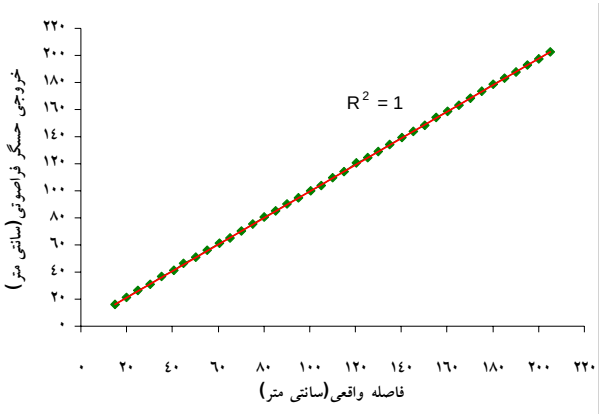
حسگرهاي فراصوتي در زاويه صفر درجه وجود دارد. در مجموع مي‌توان گفت براي فواصل كمتر از ۱۵ سانتي‌متر و زواياي بيشتر از ۱۰ درجه تشخيص درستي توسط حسگرهاي USS3 صورت نمي‌گيرد و بايد از حسگرهاي كمكي ديگري استفاده شود.

جدول ۲- نتايج حاصل از تغيير فاصله حسگرهاي فراصوتي از ديواره با زواياي مختلف*

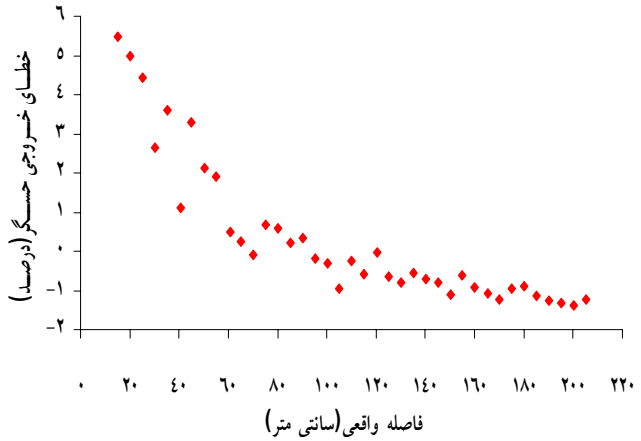
فاصله / زاويه	۱۵	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰	۶۰	۷۰	۸۰	۹۰	۱۰۰	>۱۰۰
۰	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۱۰		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
۲۰			+	+	+	+	+	+	+		
۳۰			+	+	+	+	+	+			
۴۰			+	+	+						
>۴۰											

* فواصل بر حسب سانتي متر و زوايا بر حسب درجه مي باشند. علامت + بيانگر آن است كه در فاصله و زاويه مربوطه ديواره توسط حسگر رويت شد.

نمودار شكل (۶) مقادير خروجي حسگر فراصوتي در برابر مقادير واقعي فواصل و شكل (۷) درصد خطاي خروجي حسگرهاي فراصوتي در زاويه صفر درجه با فواصل مختلف را نشان مي‌دهند. مشاهده مي‌شود كه در فواصل كم مقدار خطا زياد است. بيشترين مقدار خطا در فاصله ۱۵ سانتي‌متري و برابر با ۵/۴۹ درصد مي‌باشد. با افزايش فاصله حسگر از ديواره مقدار خطا نيز كاهش مي‌يابد به گونه اي كه در فاصله ۱۰۰ سانتي‌متري مقدار اين خطا به حدود صفر درصد مي‌رسد، ولي با افزايش فاصله مجدداً مقدار خطا زياد مي‌شود و در فاصله ۲۱۰ سانتي متري و بيشتر مقدار خطا به شدت افزايش مي‌يابد كه بيانگر آن است كه با مقادير انتخاب شده براي پارامترهاي داخلي حسگرهاي فراصوتي USS3 نمي‌توان اين حسگرها را در فواصل بيشتر از ۲۱۰ سانتي‌متري استفاده نمود. از آنجائي كه عرض راهروهاي رايج در گلخانه ها بين ۴۰ تا ۲۰۰ سانتي متر است، لذا مي‌توان اين حسگرها را با تنظيمات انتخاب شده در محيط گلخانه‌ها به كار برد و بهترين فاصله براي به كارگيري اين حسگرها در اين شرايط ۱۵ تا ۲۰۰ سانتي‌متر است، زيرا مقدار خطا در اندازه‌گيري فاصله در اين محدوده كمتر از ۵ درصد است كه قابل قبول است.

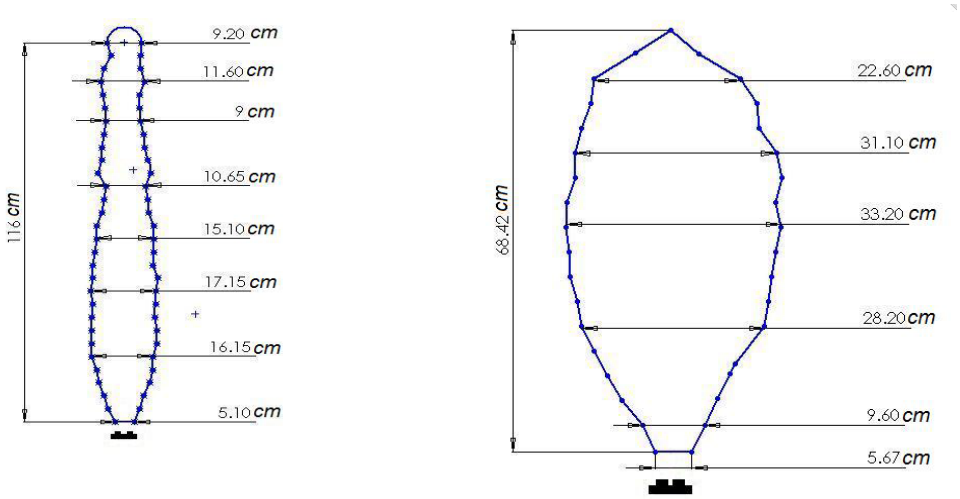


شكل۶- خروجي حسگر فراصوتي در برابر مقادير واقعي فواصل



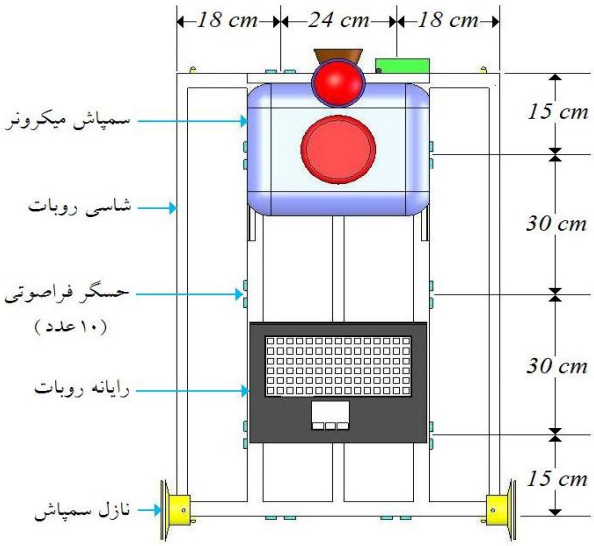
شكل ۷- درصد خطاي خروجي حسگرهاي فراصوتي در فواصل مختلف

شكل (۸) ناحيه ديد حسگرهاي فراصوتي USS3 براي اجسام با سطوح صاف و مدور به دست آمده از آزمايش دوم را نشان مي‌دهد. ديده مي‌شود كه حداكثر عرض ناحيه ديد حسگرها براي سطوح صاف ۱۷/۱۵ سانتي‌متر و براي سطوح مدور ۳۳/۲۰ سانتي‌متر است. با توجه به نتايج به دست آمده در اين آزمايش فاصله دو حسگر فراصوتي از همديگر در روي شاسي روبات بايستي حداكثر ۳۳ سانتي‌متر باشد. با در نظر گرفتن طرح روبات طراحي شده (شكل ۱)، حسگرهاي فراصوتي با فاصله ۳۰ سانتي‌متر از يكديگر بر روي شاسي نصب خواهند شد. از آنجائي كه عرض و طول شاسي روبات طراحي شده به ترتيب ۶۰ و ۹۰ سانتي‌متر مي‌باشند، لذا دو عدد حسگر فراصوتي در عرض روبات و سه عدد حسگر فراصوتي در طول روبات نصب خواهند شد كه مجموع ميدان ديد آنها تمام اطراف روبات بجزء گوشه ها را پوشش مي‌دهد. در مجموع ۱۰ عدد حسگر فراصوتي براي توليد سيگنال‌هاي هادي روبات و تشخيص موانع مورد نياز است، كه چيدمان نهايي آنها در اطراف روبات مطابق شكل (۹) خواهد بود.

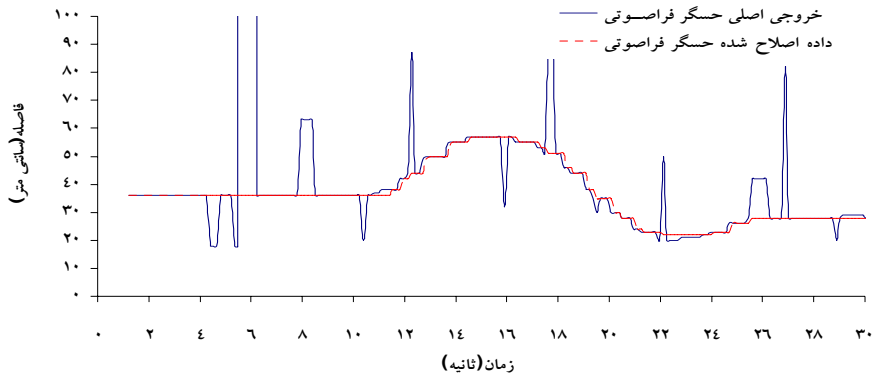


شكل ۸- ناحيه ديد حسگرهاي فراصوتي براي اجسام با سطح مدور(راست) و سطح صاف(چپ)

نتايج به دست آمده از آزمايش سوم به منظور بررسي توانايي حسگرهاي فراصوتي در تعيين مقادير جهت و موقعيت ارابه در شكل‌هاي (۱۰ تا ۱۲) نشان داده شده است. نمودار شكل (۱۰) نمونه‌اي از خروجي يكي از حسگرهاي فراصوتي نصب شده در طرف راست ارابه را قبل و بعد از حذف نويز نشان مي‌دهد. از اين شكل ديده مي‌شود كه فيلتر ميانه قادر است نويزهاي موجود در خروجي حسگرهاي فراصوتي را به خوبي حذف نمايد. استفاده از اين فيلتر باعث يک تاخير زماني در خروجي نهايي حسگرها مي‌شود كه مي‌تواند بر هدايت دقيق روبات در مسير تعيين شده در سرعت‌هاي پيشروي بالا اثر منفي داشته باشد. ولي با توجه به اينكه سرعت پيشروي روبات در حين انجام عمليات مختلف در درون گلخانه نسبتاً پائين است، در نتيجه اين تاخير زماني تاثير چنداني بر هدايت دقيق روبات در مسير تعيين شده نخواهد داشت.



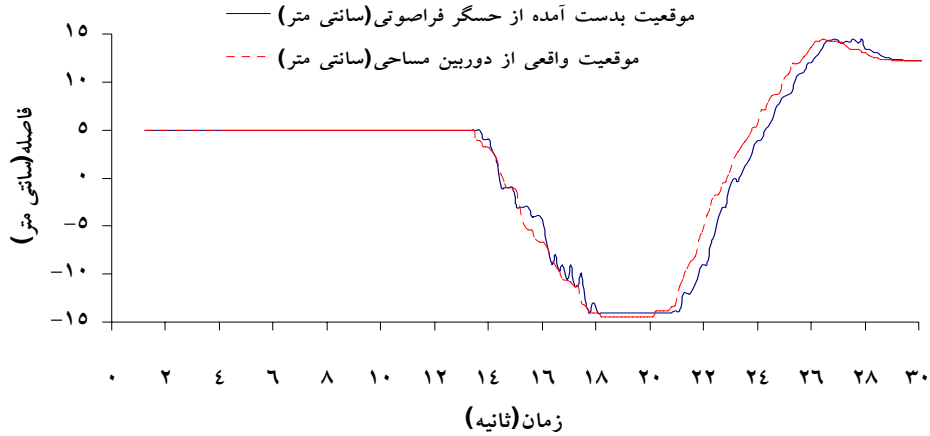
شكل۹- چيدمان نهايي حسگرهاي فراصوتي در اطراف روبات(نماي بالا)



شكل ۱۰- نمونه اي از خروجي يكي از حسگرهاي فراصوتي سمت راست ارابه قبل و بعد از نويزگيري

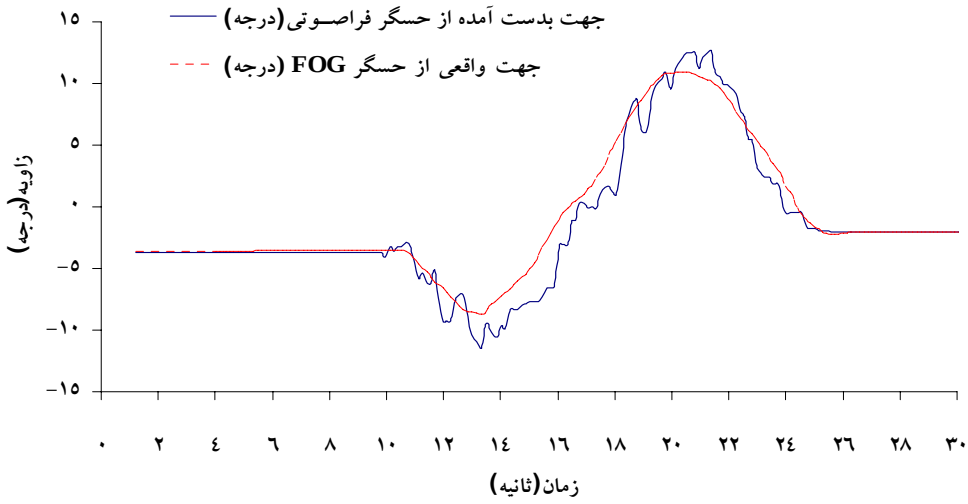
نمودار شكل (۱۱) مقايسه‌اي بين مقدار موقعيت حسگر فراصوتي و موقعيت واقعي ارابه را -كه از داده‌هاي دوربين مساحي به دست آمده است- در يكي از تكرارها نشان مي‌دهد. ديده مي‌شود كه الگوريتم ميانگين‌گيري قادر است به خوبي مقدار موقعيت را از داده‌هاي اصلاح شده حسگرهاي فراصوتي محاسبه نمايد. با توجه به تاخير زماني به وجود آمده در خروجي نهايي حسگرهاي فراصوتي ديده مي‌شود كه در مقدار متغير موقعيت نيز اندكي تاخير زماني وجود دارد. همچنين در مقايسه

مقادير موقعيت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي با مقادير محاسبه شده از داده‌هاي دوربين مساحي، حداكثر مقدار اختلاف بين آنها ۳ سانتي‌متر و مقدار RMSE آنها ۰/۷۱۴ سانتي‌متر به دست آمد. در آزمايشات Singh et al. (۲۰۰۵) ميانگين RMSE انحراف از مسير اصلي كمتر از ۲/۵ سانتي‌متر براي راهرويي با عرض ٦١ سانتي‌متر بود. ديده مي‌شود كه مقدار RMSE در اينجا كمتر از نتايج آنها است و دليل آن مي‌تواند ناشي از تفاوت در نوع و تعداد حسگرهاي فراصوتي استفاده شده در اين تحقيق با تحقيق Singh et al. (۲۰۰۵) باشد. آنها از دو حسگر فراصوتي در هر طرف روبات استفاده كردند در حالي كه در اين تحقيق از ۴ عدد حسگر فراصوتي در هر طرف روبات استفاده شد. در طرح نهايي تعداد حسگرها بايستي بر اساس دو معيار دقت مورد نياز و هزينه ساخت سيستم انتخاب شود.



شكل ۱۱- مقادير موقعيت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي و موقعيت واقعي ارابه

نمودار شكل ۱۲ مقادير جهت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي و همچنين جهت واقعي ارابه را -كه از حسگر FOG به دست آمده است- نشان مي‌دهد. ملاحظه مي‌شود كه مي‌توان توسط حسگرهاي فراصوتي و با استفاده از الگوريتم ميانگين‌گيري به خوبي مقدار جهت را از داده‌هاي اصلاح شده حسگرهاي فراصوتي به دست آورد. با توجه به تاخير زماني به وجود آمده در خروجي نهايي حسگرهاي فراصوتي ملاحظه مي‌شود كه در مقدار متغير جهت نيز اندكي تاخير زماني وجود دارد و بايستي با اتخاذ تمهيداتي مقدار اين تاخير زماني را به حداقل رساند. از طرفي ديگر در مقايسه مقادير جهت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي با مقدار به دست آمده از حسگر FOG، حداكثر مقدار اختلاف داده‌ها ۱۱/۲۳ درجه و مقدار RMSE آنها ۴/۰۳۶ درجه به دست آمد.



شكل ۱۲- مقادير جهت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي و جهت واقعي ارابه

با توجه به شكل (۱۱) ملاحظه مي‌شود كه مقادير موقعيت به دست آمده از خروجي حسگرهاي فراصوتي نوسانات و در نتيجه خطاي اندكي در طول مسير دارد، و از شكل (۱۲) مشاهده مي شود كه مقادير جهت به دست آمده از خروجي

حسگرهاي فراصوتي نوسانات و در نتيجه خطاي زيادي در طول مسير دارد، لذا مي‌توان گفت كه دقت حسگرهاي فراصوتي در تعيين موقعيت بالاست و مي توان با استفاده از آنها موقعيت روبات را به خوبي به دست آورد، ولي دقت آنها در تعيين جهت پائين‌تر است، لذا بايد از يک حسگر زاويه كمكي (مثلاً قطب نماي ديجيتالي يا IMU[22]) در روبات استفاده شود. با تركيب خروجي اين حسگر كمكي با مقادير جهت به دست آمده از حسگرهاي فراصوتي، جهت روبات با دقت بالاتري تعيين خواهد شد.

نتيجه گيري كلي

در اين مقاله دقت حسگر فراصوتي USS3 در تعيين فاصله و زاويه از ديواره عمودي اندازه‌گيري شد. ناحيه ديد اين نوع حسگر تعيين شد. توانايي حسگر فراصوتي منتخب در تعيين موقعيت و جهت روبات متحرک براي كار در محيط گلخانه ارزيابي شد. از آزمايشات انجام شده مي‌توان نتايج كلي زير را گرفت:

مي‌توان از اين نوع حسگر براي تعيين جهت و موقعيت روبات طراحي شده در درون راهروي گلخانه استفاده نمود.

دقت اين نوع حسگر در اندازه‌گيري موقعيت خوب ولي در اندازه‌گيري زاويه نسبتاً ضعيف است.

تعداد و چيدمان نهايي حسگرهاي فراصوتي در اطراف روبات طراحي شده مشخص شد.

22. Inertial Measurement Unit

سپاسگزاري

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشي به شماره ۷۱۰۹۰۱۴/۱/۰۴ با عنوان " ارزيابي عملكرد حسگرهاي فراصوتي در تعيين فاصله و زاويه براي كاربرد در ماشين‌هاي كشاورزي" مصوب دانشگاه تهران مي‌باشد. از معاونت محترم پژوهشي دانشگاه تهران به خاطر تامين منابع مالي اين طرح قدرداني مي‌گردد. همچنين از جناب آقاي دكتر نوبورو نوگوچي استاد آزمايشگاه Vehicle Robotics دانشگاه هوكايدو در ژاپن و همكاران و دانشجويان ايشان در آن آزمايشگاه كه همكاري صميمانه اي را در پي ريزي و انجام آزمايشات اين مقاله داشتند، تشكر مي شود.

معرفي نمادها

نماد	تعريف	واحد
e	ميزان انحراف جانبي ارابه يا روبات نسبت به خط مركزي راهرو	cm
l	فاصله رو به جلو	cm
n	تعداد نقاط داده برداري شده در طول مسير حركت ارابه	–
RMSE	خطاي مربع ميانگين ريشه ها	cm
V_L	ولتاژ موتور سمت چپ روبات	V
V_R	ولتاژ موتور سمت راست روبات	V
ϕ	زاويه فرمانگيري روبات	deg
θ	ميزان انحراف زاويه اي روبات نسبت به خط مركزي راهرو	deg

REFERENCES

Aghkhani, M. H. & Abbaspour Fard, M. H. (2009). Automatic off-road vehicle steering system with a surface laid cable: Concept and preliminary tests. *Biosystems Engineering*, 103(1), 265 – 270.

Alimardani, R., Taher Khoramabadi, A., Oroojlou, M., & Mesgari, Sh. (1994). *Remote control garden tractor.* Project report, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Farsi)

Barawid, O. C., Mizusshima, A., Ishii, K. & Noguchi N. (2007). Development of an autonomous navigation system using a two-dimensional laser scanner in an orchard application. *Biosystems Engineering,* 96(2), 139-149.

Bayati, M. R. (1994). *Design, construction and performance evaluation of self leveling system on a tractor.* M. Sc. thesis, Agricultural Machinery Engineering Division, Faculty of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran. (In Farsi)

Best Technology Company. (2008). *USS3 Ultrasonic Sensor.* Retrieved May 20, 2008, from http://www.besttechnology.co.jp.

Cho, S. I. & Ki, N. H. (1999). Autonomous speed sprayer using machine vision and fuzzy logic. *Transactions of the ASAE*, 42(40), 1137-1143.

Gray, K. W. (2000). *Obstacle detection and avoidance for an autonomous farm tractor.* M. Sc. Thesis, Utah State University, Logan, Utah, USA.

Karparvar Fard, H. (1990). *Design, construction and evaluation of a self leveling system on a tractor.* M. Sc. Thesis, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran. (In Farsi)

Seidi, E. (2005). *Evaluation of using from automatic steering system on common tractors in Iran with appropriate technology.* M. Sc. Thesis, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (In Farsi)

Shariati, S. I. (2004). *Design and fabrication of a prototype manipulator for fruits detection in a special direction.* M. Sc. Thesis, Department of

Agricultural Machinery Engineering, Faculty of agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. (In Farsi)

Shin, B. & Kim, S. (2001). Autonomous guidance system for small orchard sprayer with ultrasonic sensors. *ASAE Paper No. 011193,* St Joseph, MI: ASAE.

Singh, S., Burks, T. F. & Lee, W. S. (2005). Autonomous robotic vehicle development for greenhouse spraying. *Transactions of the ASAE*, 48(6), 2355−2361.

Tillett, N. D. (1991). Automatic guidance sensors for agricultural field machines: A Review. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 50, 167-187.