ششمین کنگره ملی مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون
پردیس کشاورزی و منابع‌طبیعی دانشگاه تهران (کرج)
۲٤ و ۲۵ شهریور ۱۳۸۹

طراحی، ساخت و ارزیابی یک روبات متحرک برای انجام عملیات سمپاشی در داخل گلخانه

حسن مسعودی[۱]، رضا علیمردانی[۲]، محمود امید[۲]، سید سعید محتسبی[۳]، سعید باقری شورکی[٤]

۱- استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز،
hmasoudi@scu.ac.ir

۲ و ۳ – دانشیاران و استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی دانشگاه تهران

٤- دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف

چکیده

وجود عملیات های سخت و طولانی در بخش کشاورزی و اهمیت انجام صحیح هر یک از این عملیات ها که مستقیماً بر روی کیفیت و کمیت محصولات این بخش اثرگذار است، لزوم استفاده از تجهیزات مکانیزه و خودکار را امری بدیهی می نماید. هدف اصلی از این تحقیق خودکار کردن عملیات سمپاشی گلخانه ها به کمک یک وسیله نقلیه خودکار بود که برای تحقق این هدف یک روبات متحرک ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. روبات ساخته شده یک روبات متحرک با دو چرخ محرک در قسمت عقب و یک چرخ هرزگرد در قسمت جلو و با فرمانگیری دیفرانسیلی است. از تابع کنترلی تناسبی (P) برای کنترل و هدایت روبات استفاده شد.

آزمون های عملی در یک گلخانه در داخل راهروهایی با عرض ۹۸ سانتی متر به منظور ارزیابی عملکرد روبات در پیمودن یک مسیر U شکل بر روی سطح سیمانی و همچنین ارزیابی عملکرد واحد سمپاشی آن انجام شد. برای تعیین میزان انحراف روبات از مسیر واقعی در آزمون های گلخانه ای از شاخص آماری RMSE استفاده شد. بر اساس نتایج ارزیابی عملکرد روبات در گلخانه، با افزایش سرعت پیشروی روبات مقدار میانگین RMSE انحراف جانبی روبات نیز افزایش یافت. حداقل مقدار میانگین RMSE در سرعت ۱۵ سانتی متر بر ثانیه برابر ٤/۹۳ سانتی متر و بیشترین مقدار آن در سرعت ۳۵ سانتی متر بر ثانیه برابر ٦/۵۱ سانتی متر بود. با افزایش سرعت پیشروی روبات، شعاع دور زدن، میزان پراکندگی مسیرهای دور زدن در تکرارهای مختلف از یکدیگر و فضای مورد نیاز برای دور زدن روبات در انتهای راهرو افزایش یافت. عملکرد واحد های ایمنی و ایستگاه مرکزی روبات نیز مطلوب و قابل قبول بود. از آزمون ارزیابی عملکرد واحد سمپاشی روبات نیز میانگین دقت واحد سمپاشی در "سمپاشی" ۹۹/٤۷ درصد و در "عدم سمپاشی" ۹۹/۹۲ درصد و در کل ۹۹/٦۹ درصد به دست آمد.

کلید واژه: روبات متحرک، حسگر فراصوتی، کنترل تناسبی، گلخانه، سمپاشی.

۱- مقدمه و هدف

اصولاً هدف از تحقیقات در زمینه روباتیک طراحی و ساخت ماشین های خودکاری است که قادرند در کاربردهای خاص یا عمومی، کارهای تکراری و یا خطرناک را در زمانی کمتر و با دقت و ضریب اطمینان بالاتری نسبت به انسان انجام دهند. این نوع تحقیقات در تمام شاخه های علمی چندین دهه است که در دنیا در حال انجام است و تا کنون نیز دانشمندان به موفقیت های فراوانی در ساخت روبات ها دست یافته اند. تعداد تحقیقات انجام شده و در حال انجام جهت ساخت روبات هایی برای استفاده در بخش صنعت بیشتر از بخش کشاورزی بوده است. در کشور ما نیز با وجود تحقیقات بسیار در زمینه ساخت روبات های صنعتی، تحقیقات بسیار اندکی در زمینه طراحی و ساخت روبات هایی برای کاربرد در بخش کشاورزی انجام شده است. دلیل این امر نیز فراوانی و ارزانی نیروی کار در ایران است که حتی گاهی اوقات مانع بکارگیری ماشین های مرسوم کشاورزی در این بخش نیز شده است. اما با روند شدید کاهش نیروی کار در بخش کشاورزی ایران از یکسو و افزایش جمعیت کشور از سوی دیگر لزوم بکارگیری تجهیزات مکانیکی خودکار در بخش کشاورزی ایران بر کسی پوشیده نیست. یقیناً در آینده ای نزدیک با پیوستن ایران به سازمان تجارت جهانی، استفاده از ماشین ها و تجهیزات مکانیکی غیرخودکار به دلیل عدم علاقه نسل جدید به کارهای کشاورزی و نیز لزوم تولید محصولاتی با کیفیت بالاتر به تنهایی کارساز نیست و ما مجبور خواهیم بود همچون کشورهای پیشرفته دنیا به فکر بکارگیری اتوماسیون و روبات ها در بخش کشاورزی خود باشیم.

محققان زیادی در نوشته های خود کاربرد وسایل نقلیه خودکار در بخش کشاورزی را گزارش کرده انـد. در اینجـا اشاره ای به بعضی از کارهای انجام شده در این زمینه می گـردد. شـین و کـیم (Shin and Kim, 2001) سیسـتم هـدایت خودکار برای یک سمپاش کوچک باغی را با بکارگیری اهداف لوله استیل ضدزنگ جهت انعکاس امواج فراصـوتی بـه سمت حسگرهای فراصوتی توسعه دادند. میسائو(Misao, 2001) ماشین بینایی را بـرای سیسـتم فرمـانگیری خودکـار بـا استفاده از تخته های هدف قرمز رنگ، جهت هدایت یک سمپاش برقی بکار گرفت. یک دوربین ویدئویی جهت گرفتن تصویر از مسیر حرکت شامل اهداف قرمز رنگ استفاده شد. الگوریتم های پردازش تصـویر فاصـله از موقعیـت کنـونی وسیله نقلیه تا هدف را تعیین می کردند و سپس موقعیت واقعی تا مسیر تعریف شده وسیله نقلیه مقایسه شد و از طریق یک سیستم کنترل فرمانگیری خودکار اصـلاح شـد. اسـتومباغ و شـیئرر (Stombaugh and Shearer, 2001) یـک سیسـتم هدایت خودکار بر مبنای DGPS را برای کنترل فرمانگیری خودکار یک وسـیله نقلیـه پرسـرعت پاشـنده مـواد شـیمیایی توسعه دادند. گیرنده DGPS بازخورد موقعیت را فراهم می کرد، در حالیکه یک سوپاپ کنترل مستقیم سولونوئیدی عمل فرمانگیری را انجام می داد. دانیل و پارسونز (Daniel and Parsons, 2003) بر روی یک سیستم کنتـرل دبـی خروجـی بـا استفاده از شیر کنترل PWM بر روی سمپاش های بوم‌دار کار کردند که براساس سرعت واقعی چرخ سمپاش، خروجـی

سم را تنظیم و کنترل می کرد. شریعتی(۱۳۸۳) نمونه بازوی مکانیکی روبات جهت تشخیص میوه در یک مسیر خاص را طراحی نموده و ساخت. مساح(۱۳۸۳) در تحقیق خود دستکار[1] و کارگیر[2] ماشین هرس روباتیک مجهز به سیستم کنترل نیرو را برای هرس درختچه های پارک ها، طراحی نموده و ساخت. آق خانی و عباسپور فرد (Aghkhani and Abbaspour-Fard, 2009) سیستم هدایت خودکار تراکتورهای کشاورزی با استفاده از یک کابل مرئی را ساختند. در سیستم ایشان ابتدا یک کابل فولادی حاوی جریان الکتریکی ضعیف بر روی مسیر حرکت مطلوب و بر روی سطح خاک قرار داده می شد. سیستم هدایت خودکار طراحی شده درحین حرکت رو به جلوی تراکتور، میزان انحراف خط مرکزی تراکتور از کابل فولادی را توسط یک چرخ پنجم با دیسک های فولادی حاوی جریان الکتریکی حس نموده و انحراف تراکتور از راستای حرکت را بصورت خودکار اصلاح می نمود.

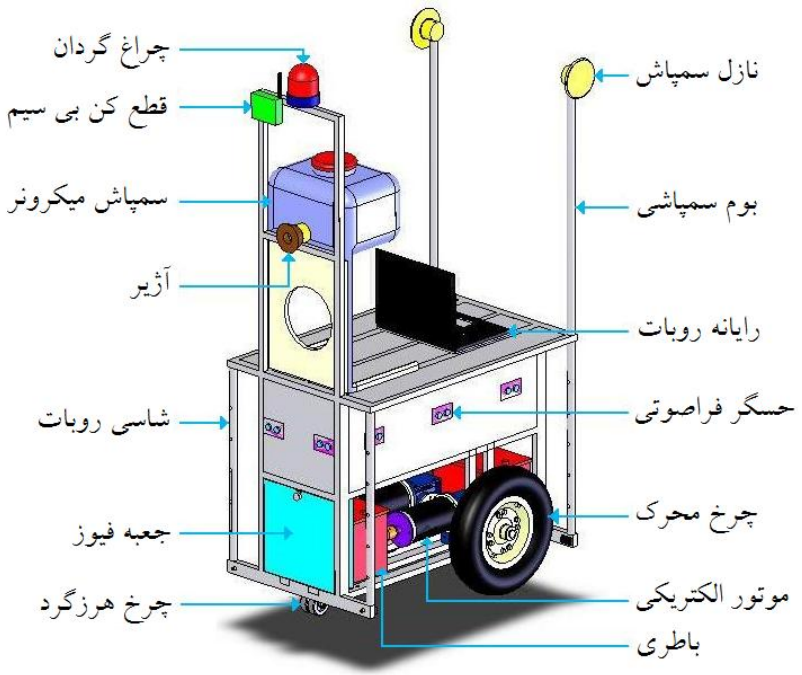
هدف از این تحقیق انجام عملیات سمپاشی گلخانه ها به صورت کاملاً خودکار می باشد که برای تحقق این هدف یک سیستم هدایت خودکار طراحی شد و بر روی یک وسیله نقلیه کوچک (روبات متحرک) به منظور هدایت و کنترل خودکار آن در یک مسیر از پیش تعیین شده در داخل گلخانه پیاده سازی گردید. در این مقاله ابتدا واحدهای مختلف تعبیه شده در روبات و اجزاء سخت افزاری و نرم افزاری آن توضیح داده می شوند و در ادامه نتایج آزمایشات انجام شده برای ارزیابی عملکرد سامانه هدایت خودکار روبات و واحد سمپاشی آن بیان می گردد.

۲- مواد و روش ها

۲-۱ اجزاء روبات

روبات ساخته شده در این تحقیق یک روبات متحرک با دو چرخ محرک در قسمت عقب روبات و یک چرخ هرزگرد در قسمت جلوی آن است. این روبات دارای دو موتور محرک الکتریکی جریان مستقیم (۲٤ ولت و ۵۰۰ وات) مشابه است که در دو سمت چپ و راست آن نصب شده اند و روبات برای رانش و فرمانگیری از آنها استفاده می کند. نوع فرمانگیری روبات دیفرانسیلی[3] است که برای حرکت مستقیم هر دو موتور با سرعت یکسان می چرخند و برای گردش به یک سمت، با توجه به سرعت دورانی پیش فرض روبات، سرعت دورانی موتور سمت مخالف آن اندکی افزایش یافته و سرعت دورانی موتور سمت موافق به همان میزان کاهش می یابد. شکل۱(الف) نمای سه بعدی رایانه ای و شکل۱(ب) تصویر واقعی روبات ساخته شده را نشان می دهند.

[1] Manipulator
[2] End effectors
[3] Differential Steering



(الف) نمای سه بعدی رایانه ای (ب) عکس واقعی

شکل۱- تصاویر رایانه ای و واقعی و اجزاء مختلف روبات ساخته شده

این سیستم توانائی آنرا دارد که روبات را در داخل یک گلخانه از نقطه ای به نقطه دیگر بطور خودکار هدایت نماید، تا عملیات سمپاشی محصولات انجام شود. البته این روبات قابلیت آنرا دارد که با نصب تجهیزات مربوطه جهت انجام سایر عملیات ها مانند دیده بانی، جمع آوری پارامترهای محیطی و رشد گیاهان، آبیاری، جابجائی گلدان ها و غیره نیز بکار رود، ولی از آنجائیکه انجام عملیات سمپاشی توسط انسان در یک محیط بسته همچون گلخانه، خطرات زیادی را برای وی به همراه دارد، لذا بنظر می رسد خودکار کردن عملیات سمپاشی نسبت به سایر عملیات های مربوط به تولید محصولات گلخانه ای از اولویت بالاتری برخوردار است، بنابراین سمپاشی بعنوان عملیات کاری اصلی در این تحقیق انتخاب شد.

اجزاء روبات شامل دو بخش اصلی سخت افزاری و نرم افزاری است. اجزاء و واحدهای سخت افزاری عبارتند از :

۱- ایستگاه مرکزی
۲- واحد کنترل
۳- واحد حسگرها
٤-واحد عملگرها
۵- واحد ایمنی
٦- واحد سمپاشی
۷- شاسی و بدنه

اجزاء نرم افزاری نیز شامل دو گروه اصلی زیر می باشند:

الف- الگوریتم های سیستم هدایت خودکار روبات ب- نرم افزارهای سیستم هدایت خودکار روبات

برای پیاده سازی و اجرای الگوریتم های سیستم هدایت خودکار روبات در رایانه، نیازمند نرم افزارهـای رایانـه ای برای اجرای الگوریتم های کاری از یک طرف و برقراری ارتباط با کاربر از طرف دیگر هستیم. در این تحقیق سه برنامـه رایانه ای جامع با استفاده از زبان برنامه نویسی ویژوال++C و در محیط کمپایلر Visual Studio 2008 نوشـته شـد که عبارتند از:

الف) برنامه رایانه ای میکروکنترلر ب) نرم افزار رایانه روبات ج) نرم افزار رایانه کاربر

کنترل و نظارت کاربر بر روی عملکرد روبات از طریق نرم افزارهای سیستم هـدایت خودکـار روبـات میسـر مـی شود. این نرم افزارها رابط بین کاربر و روبات هستند. یکی از این نرم افزارها در ایستگاه مرکزی بـر روی رایانـه کـاربر نصب گردید و دیگری بر روی رایانه روبات. برنامه رایانه ای میکروکنترلر نیز در درون حافظه فلش[1] میکروکنترلر ریخته شد.

۲-۱-۳ واحد سمپاشی

واحد سمپاشی در این روبات عبارت است از یک سیستم کنترل دبی سم با استفاده از باز و بسته کردن شیر کنترل جریان در مواقع مورد نیاز و یک سیستم پایش جهت نمایش پارامترهای مربوط به سمپاشی. واحد کنترل موقع حرکت روبات در مسیر مستقیم و در بین ردیف های محصول در ابتدای ردیف محصول شیر کنترل جریان سم را باز نموده و سمپاشی شروع می شود و با رسیدن روبات به انتهای هر ردیف شیر کنترل جریان سم را قطع می کند. واحد سمپاشی از اجزاء سخت افزاری زیر تشکیل شده است:

۱. سمپاش میکرونر بوم دار با کلیه تجهیزاتش
۲. حسگر فشارسنج: در واحد سمپاشی از یک حسگر برای اندازه گیری فشار محلول سم در لوله خروجی سمپاش استفاده شد. این حسگر، فشار محلول سم در لوله خروجی سمپاش را نشان می دهد.
۳. عملگرهای واحد سمپاشی: در واحد سمپاشی روبات چهار عدد عملگر وجود دارند که برای سمپاشی باید فعال شوند و برای قطع سمپاشی باید از کار بیفتند این عملگرها عبارتند از: یک عدد شیر برقی، یک عدد پمپ کوچک، دو عدد نازل میکرونر.

این سیستم در سه حالت زیر پاشش سم را قطع نموده و با استفاده از یک هشدار دهنده به کاربر اطلاع می دهد:

۱- هنگام دور زدن روبات در انتهای ردیف های محصول
۲- در موقع خالی شدن مخزن سم
۳- در مواقع توقف روبات به هر دلیلی از جمله برخورد با یک مانع

۲-۳ سیستم هدایت خودکار روبات

[1] Flash memory

با توجه به هدف تعیین شده، روبات بایستی بتواند در درون گلخانه، راهروی بین دو ردیف گلدان ها را تشخیص داده و در آن حرکت کند. در اکثر گلخانه ها از یک سکو یا میز و یا پایه های فلزی برای نگهداری گلدان ها استفاده می شود که می توان از لبه آنها بعنوان خطوط هادی روبات بهره برد. مطابق شکل۲ لبه های ردیف گلدان ها بعنوان خطوط هادی و خط مرکزی راهرو نیز که به موازات ردیف گلدان هاست بعنوان خط هدف در نظر گرفته شد.

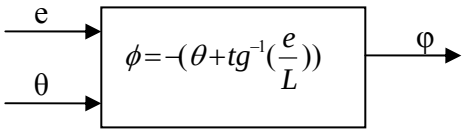
این روبات از دو روش برای تولید سیگنال های هادی استفاده می کند. در بین ردیف های محصول از ٦ عدد حسگرهای فراصوتی(USS3, Best Technology Co., Japan) نصب شده در دو طرف روبات و در خارج از ردیف محصول ها و نیز انتهای ردیف ها برای دور زدن از روش تخمین مسافت استفاده می کند.

شکل۲- نمایش خطوط هادی و خط هدف در یک گلخانه پرورش گل

۲-۳-۱ نحوه هدایت خودکار روبات در درون راهروهای گلخانه

برای هدایت خودکار روبات در داخل راهروها، در هر حالتی که روبات قرار دارد مقادیر موقعیت آن نسبت به خط هدف(e) و جهت حرکت آن نسبت به خط هدف(θ) با استفاده از داده های حسگرهای فراصوتی تعیین شده و به واحد کنترل ارسال می گردد.

زاویه فرمانگیری روبات یک پارامتر میانی است که پارامترهای ورودی(جهت و موقعیت روبات) را به پارامترهای خروجی (ولتاژهای چپ و راست) مرتبط می سازد. در درون راهروها با استفاده از ساختار روبات، مقدار زاویه فرمانگیری بر اساس مقادیر جهت و موقعیت روبات محاسبه شد(مسعودی و همکاران، ۱۳۸۸)، که تابع تبدیل به دست آمده یک تابع غیرخطی به صورت زیر می باشد:



(۱)

در ادامه واحد کنترل بر اساس مقدار زاویه فرمانگیری به دست آمده سیگنال های لازم را برای چرخش موتورهای محرک روبات تولید می نماید.

۲-٤ آزمون ها و ارزیابی ها

پس از ساخت اجزاء مختلف روبات، سیستم هدایت خودکار طراحی شده بر روی آن پیاده سازی گردید و سپس روبات در داخل یک گلخانه مورد ارزیابی و آزمون قرار گرفت تا کارآیی اجزاء و واحدهای مختلف آن مشخص شود.

۲-٤-۱ ارزیابی عملکرد سیستم هدایت خودکار روبات در گلخانه

روبات به گلخانه ای که دارای سکوها و کف بتونی و فضای کافی برای دور زدن در انتهای راهروها بود، انتقال داده شد و عملکرد روبات در پیمودن یک مسیر U شکل و همچنین عملکرد واحد سمپاشی روبات ارزیابی گردید. این گلخانه دارای سکوهایی از جنس بتون به ارتفاع ۹۲ سانتی متر و بطول ۱۷۹٤ سانتی متر با عرض راهروهای ۹۳ تا ۱۲۲ سانتی متر بود. عرض راهروهای منتخب برای ارزیابی روبات ۹۸ سانتی متر و طول آنها ۱۳۹٤ سانتی متر و فاصله جانبی آنها از یکدیگر ۳۸۲ سانتی متر بود. در این گلخانه عملکرد روبات در پیمودن مسیر U شکل در سه سرعت پیشروی ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی متر بر ثانیه با کنترلر تناسبی(رابطه ۱) و در پنج تکرار در هر سرعت ارزیابی گردید. در این آزمون ها، کارآیی حسگرهای تشخیص مانع در تشخیص به موقع موانع و عدم برخورد روبات با آنها و همچنین هدایت روبات بصوت کنترل از راه دور از طریق رایانه کاربر در ایستگاه مرکزی که با رایانه روبات تبادل اطلاعات می نمود، نیز ارزیابی شد. بعد از انجام آزمون ها میزان انحراف روبات از مسیر واقعی در سرعت های پیشروی مختلف تعیین گردید.

۲-٤-۲ ارزیابی عملکرد واحد سمپاشی روبات

عملکرد واحد سمپاشی روبات از نظر باز و بسته کردن به موقع شیر کنترل جریان در آزمون های انجام شده در درون گلخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدای مسیر حرکت (نقطهA) روبات روشن شده و با پیمودن راهروی اول در درون آن اقدام به سمپاشی گلدان های دوطرف راهرو بر روی سکوها می کرد و با رسیدن به انتهای راهروی اول در حین چرخش ۱۸۰ درجه ای و رفتن روبات به درون راهروی دوم عملیات سمپاشی قطع می شد. مجدداً در ابتدای

راهروی دوم سمپاشی شروع شده و با رسیدن روبات به انتهای مسیر تعریف شده در انتهای راهروی دوم (نقطهB) ضمن توقف کامل روبات عملیات سمپاشی نیز قطع می شد. البته در مسیر منتخب در دو محل راهروهای جانبی وجود داشت که در حین عبور روبات از جلوی این راهروهای جانبی نیز عملیات سمپاشی می بایست قطع می گردید. در عمل در زمان حرکت روبات از ابتدا تا انتهای مسیر حرکت، عملیات کاری انجام شده بصورت کدهای رقمی در حافظه رایانه روبات ذخیره شد. بعد از انجام آزمون ها، برای ۱۰ تکرار از میان نتایج تکرارهای مختلف تعداد کل نقاط در مسیر حرکت، تعداد نقاطی که بایستی سمپاشی انجام می شد، تعداد نقاطی که نبایستی سمپاشی انجام می شد، تعداد نقاطی که اشتباهاً سمپاشی شده بود و تعداد نقاطی که اشتباهاً سمپاشی نشده بود، استخراج گردید. سپس با تشکیل ماتریس اغتشاش[1] برای هر تکرار مقادیر دقت واحد سمپاشی در سمپاشی و عدم سمپاشی گلخانه در تکرارهای مختلف محاسبه شد.

۲-٤-۳ تجزیه و تحلیل آماری نتایج آزمون ها

برای تعیین میزان انحراف روبات از مسیر واقعی در آزمون های گلخانه ای روبات از شاخص آماری RMSE[2] استفاده شد که از رابطه زیر محاسبه می گردد:

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

در این رابطه e مقدار انحراف روبات از خط مرکزی راهرو در هر نقطه (در واقع همان مقدار موقعیت جانبی روبات بر حسب سانتی متر) و n تعداد نقاط داده برداری شده در طول مسیر حرکت روبات است(Cho and Ki, 1999; Singh *et al.*, 2005) در تمامی آزمون های گلخانه ای روبات مقدار RMSE برای همه حالت ها و سرعت های پیشروی محاسبه شد و بر اساس مقادیر آن بهترین شرایط برای هدایت خودکار روبات تعیین گردید. عملیات آماده سازی داده ها، تعیین مقادیر و تجزیه و تحلیل نتایج توسط نرم افزار اِکسِل ۲۰۰۲ انجام شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ نتایج ارزیابی عملکرد سیستم هدایت خودکار روبات در گلخانه

مقادیر انحراف جانبی روبات از خط هدف در گلخانه (در حالت هدایت با کنترلر تناسبی) در سرعت های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ سانتی متر بر ثانیه در جدول ۱ آمده است. ملاحظه می شود که با افزایش سرعت پیشروی روبات مقدار میانگینRMSE نیز افزایش یافته است. حداقل مقدار میانگین RMSE در سرعت ۱۵ سانتی متر بر ثانیه و برابر ٤/۹۳ سانتی متر و بیشترین مقدار آن در سرعت ۳۵ سانتی متر بر ثانیه و مساوی ٦/۵۱ سانتی متر بوده است. همچنین در این

[1] Confusion matrix
[2] Root Mean Square Error(RMSE)

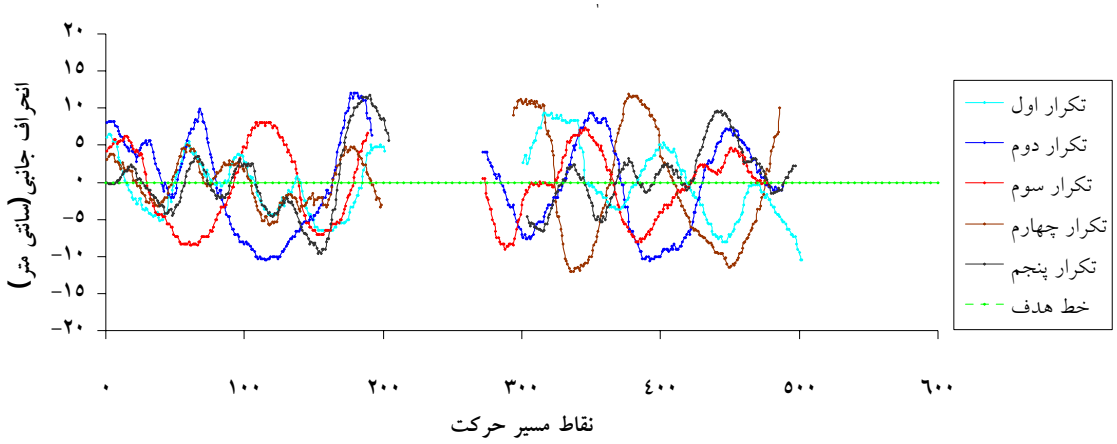
جدول مقادیر کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار(SD) انحراف جانبی روبات در تکرارها و سرعت های مختلف آورده شده است. حداکثر مقدار انحراف جانبی روبات در سرعت ۳۵ سانتی متر بر ثانیه و مساوی ۱۶ سانتی متر بود. با توجه به اینکه در این حالت میانگین مقدار RMSE در تمامی سرعت ها کمتر از هفت سانتی متر است، لذا هدایت روبات نوسانات و انحرافات جانبی کمی را ایجاد می کند و قابل قبول است. در نتیجه می توان روبات را با کنترلر تناسبی در سرعت های کمتر از ۳۵ سانتی متر بر ثانیه راه اندازی نمود.

جدول۱- مقادیر انحراف روبات از خط هدف در درون گلخانه در سرعت های مختلف

		سرعت پیشروی روبات		
تکرار	انحراف جانبی(cm)	۱۵ (cm/s)	۲۵ (cm/s)	۳۵ (cm/s)
اول	RMSE	۳/۹۷	٤/٤۹	٥/۲٤
	میانگین	۰/۳۰	-۰/٤۱	۰/٤٦
	SD	۳/۹٦	٤/٤۸	٥/۲۳
دوم	RMSE	٦/۹۸	٦/٤۱	٥/٦۱
	میانگین	۰/۸۸	-۰/۳۰	-۰/۰٦
	SD	٦/۹۳	٦/٤۱	٥/٦۱
سوم	RMSE	٤/۱۱	٥/۰۲	۸/٤۸
	میانگین	۰/٤٦	-۰/٥۹	-۰/۸۱
	SD	٤/۰۹	٤/۹۹	۸/٤٤
چهارم	RMSE	٥/۳۳	٦/۱٥	٦/۱۰
	میانگین	-۰/۱۷	-۰/۲٦	-۰/۲۲
	SD	٥/۳۳	٦/۱٥	٦/۱۱
پنجم	RMSE	٤/۲٥	٤/٦۱	۷/۱۰
	میانگین	۰/۸۷	۰/٤۷	-۱/٥۲
	SD	٤/۱۷	٤/٦۰	٦/۹٤
میانگین RMSE		**٤/۹۳**	**٥/۳٤**	**٦/٥۱**

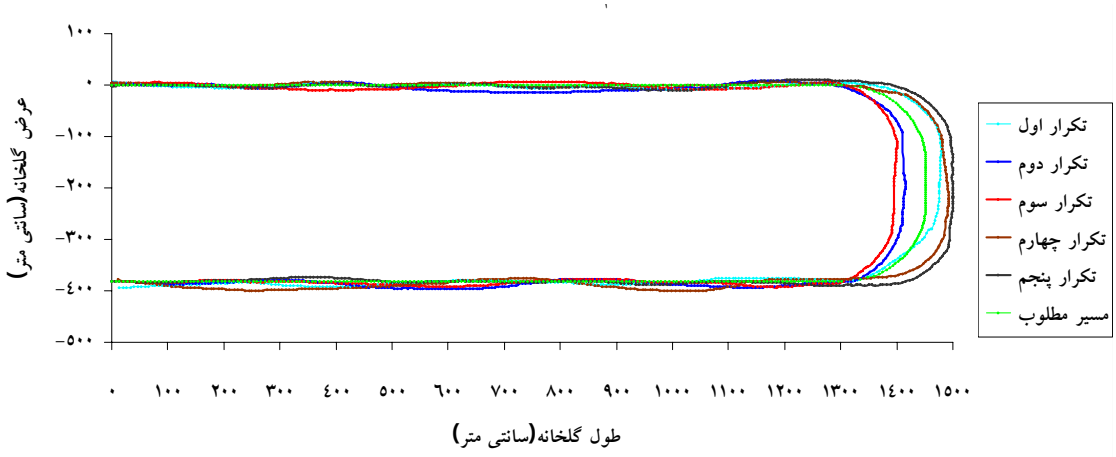
نمودارها در شکل۳ میزان انحراف روبات از خط هدف در گلخانه در سرعت پیشروی ۲۵ سانتی متر بر ثانیه و تکرارهای مختلف را نشان می دهد. فضای خالی موجود در قسمت میانی این نمودارها، محل دور زدن روبات است و مسیرهای دو طرف فضای خالی، مسیر حرکت روبات در درون راهروی اول و راهروی دوم مسیر U شکل تعریف شده است. با افزایش سرعت پیشروی روبات میزان انحراف آن از خط هدف نیز افزایش یافت. این نتایج با نتایج تحقیقات

پژوهشگران دیگر نیز کاملاً مطابقت دارد. در تحقیق آیدا و بورکس(Iida and Burks, 2002) با افزایش سرعت پیشروی وسیله نقلیه خودرو از ۱/۰۸ متر بر ثانیه تا ۱/۸٤ متر بر ثانیه مقدار میانگین RMSE فاصله حسگرهای فراصوتی از توده درختان از ۱۰/٦۷ سانتی متر به ۱۹/۳۳ سانتی متر افزایش یافت. در مطالعه کیسه و همکاران(Kise et al. 2005) با افزایش سرعت پیشروی مقدار RMSE انحراف جانبی تراکتور از مسیر اصلی افزایش یافت. در تحقیق باراوید و همکاران(Barawid *et al.* 2007) نیز با افزایش سرعت پیشروی تراکتور مقدار RMSE انحراف جانبی تراکتور از مسیر اصلی افزایش یافت. بگونه ایکه در سرعت ۰/۳٦ متر بر ثانیه مقدار RMSE انحراف جانبی ۲۱ سانتی متر و در سرعت ۱/٤۳ متر بر ثانیه مقدار آن ۱۱۲ سانتی متر به دست آمد.



شکل۳- میزان انحراف روبات از خط هدف در گلخانه (سرعت ۲۵ cm/sec)

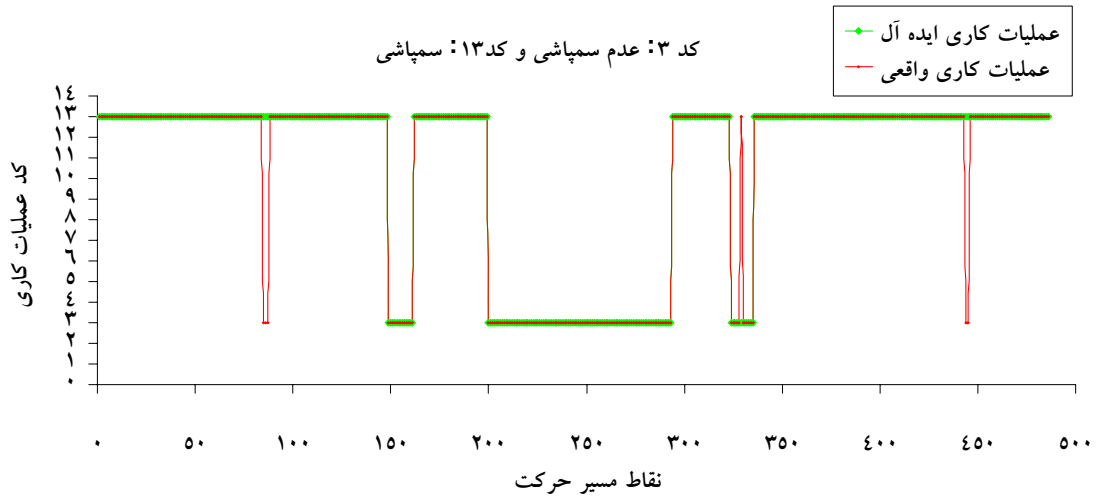
نمودارهای شکل٤ مسیرهای واقعی حرکت روبات در درون گلخانه (که یک مسیر U شکل بود) با سرعت ۲۵ سانتی متر بر ثانیه و در تکرارهای مختلف را نشان می دهند. ملاحظه می شود که با افزایش سرعت پیشروی روبات، علاوه بر افزایش میزان انحراف جانبی روبات در مسیرهای مستقیم داخل راهرو، شعاع دور زدن در انتهای راهرو، میزان پراکندگی مسیرهای دور زدن در تکرارهای مختلف از یکدیگر و نیز فاصله آنها از مسیر ایده آل دور زدن افزایش می یابد. لذا می توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت پیشروی روبات، شعاع دوران و در نتیجه فضای مورد نیاز برای دور زدن روبات در انتهای راهرو افزایش می یابد. این موضوع نیز کاملاً با قوانین پایه فیزیکی مطابقت است.



شکل٤- مسیرهای حرکت روبات در گلخانه (سرعت cm/sec ۲٥)

۳-۲ نتایج ارزیابی عملکرد واحد سمپاشی روبات

شکل٥ یکی از نمودارهای عملیات کاری روبات را نشان می دهد. پس از تشکیل ماتریس اغتشاش برای تمامی تکرارها، مقدار دقت واحد سمپاشی در "سمپاشی" و "عدم سمپاشی" نقاط مختلف گلخانه در هر ۱۰ تکرار تعیین گردید، که نتایج آن در جدول ۲ آمده است. ملاحظه می شود که میانگین دقت واحد سمپاشی در "سمپاشی" ۹۹/٤۷ درصد و در "عدم سمپاشی" ۹۹/۹۲ درصد و در کل ۹۹/٦۹ درصد است. این مقادیر دقت بیانگر آن است که واحد سمپاشی روبات بخوبی عمل نموده است و روبات ساخته شده از دقت قابل قبول و بالایی در سمپاشی گلخانه ها برخوردار است.



شکل٥- نمونه ای از نمودارهای عملیات کاری روبات (تکرار پنجم)

جدول۲- مقادیر دقت واحد سمپاشی در سمپاشی و عدم سمپاشی گلخانه در تکرارهای مختلف(درصد)

تکرار	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم	دهم	**میانگین**

□ نوع عملیات											
سمپاشی	۹۹/٥٤	۹۹/۲٦	۹۹/۷٥	۹۹/٥۲	۹۸/٦٤	۹۹/۸۰	۹۹/۸۳	۱۰۰	۹۹/۳۹	۹۹/۰۱	**۹۹/٤۷**
عدم سمپاشی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۱٦	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	**۹۹/۹۲**
کل	۹۹/٦٤	۹۹/٤٥	۹۹/۸۱	۹۹/٦۳	۹۸/۷۷	۹۹/۸٦	۹۹/۸۸	۱۰۰	۹۹/٥٦	۹۹/۲۸	**۹۹/٦۹**

٤- نتیجه گیری ها

بطور خلاصه از آزمون های انجام شده در این تحقیق و مطالب بیان شده می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- با افزایش سرعت پیشروی روبات، مقدار انحراف جانبی آن از مسیر اصلی افزایش می یابد.

۲- با افزایش سرعت پیشروی روبات، شعاع دوران و در نتیجه فضای مورد نیاز برای دور زدن روبات در انتهای راهرو افزایش می یابد.

۳- دقت واحد سمپاشی روبات ۹۹/٦۹ درصد به دست آمد. لذا روبات از دقت قابل قبول و بالایی در سمپاشی گلخانه برخوردار است.

منابع و مآخذ

۱- شریعتی، سید ایمان. ۱۳۸۳. طراحی و ساخت نمونه بازوی مکانیکی روبات جهت تشخیص میوه در یک مسیر خاص. پایان نامه کارشناسی ارشد. گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی. دانشکده کشاورزی دانشگاه تهران.

۲- مساح، جعفر. ۱۳۸۳. طراحی، ساخت و آزمون دستکار و کارگیر ماشین هرس رباتیک مجهز به سیستم کنترل نیرو. رساله دکتری در رشته مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی. دانشکده کشاورزی دانشگاه تربیت مدرس تهران.

۳- مسعودی، حسن؛ امید، محمود؛ علیمردانی، رضا؛ محتسبی، سید سعید و باقری شورکی، سعید. ۱۳۸۸. بررسی آزمایشگاهی توانائی حسگرهای فراصوتی در تعیین جهت و موقعیت روبات های متحرک برای کاربردهای گلخانه ای. مجله مهندسی بیوسیستم ایران. در نوبت چاپ.

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

5- Barawid, O. C., Mizusshima, A., Ishii, K. and 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.

6- Cho, S. I. and Ki, N. H. 1999. Autonomous speed sprayer using machine vision and fuzzy logic. Trans. ASAE 42(40):1137-1143.

7- Daniel, R. and Parsons, S. D. 2003. Sprayer Technology-Controlling Application Rate On-The-Go, Agricultural and Biological Engineering Department Case R. Medlin Botany and Plant Pathology Department.

8- Iida, M. and Burks, T. F. 2002. Ultrasonic Sensor Development for Automatic Steering Control of Orchard Tractor, Proceedings of the Automation Technology for Off-Road Equipment Conference. Pp. 221-229. July 26-27, 2002. Chicago, Illinois. USA.
9- Kise, M., Noguchi, N., Ishii, K. and Terao, H. 2002. Enhancement of turning accuracy by path planning for robot tractor. Proceedings of automation technology for Off-road equipment conference. July 26-27, 2002. Chicago, Illinois, USA. Pp. 398-404.
10- Kise, M., Zhang, Q. and Rovira-Más, F. 2005. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. Biosystems Engineering. 90(4), 357-367.
11- Misao, Y. 2001. An image processing based automatic steering power system. ASAE Paper No. 013106. St. Joseph, Mich.: ASAE.
12- Shin, B. and Kim, S. 2001. Autonomous guidance system for small orchard sprayer with ultrasonic sensors. ASAE Paper No. 011193. St. Joseph, Mich.: ASAE.
13- Singh, S., Burks, T. F. and Lee, W. S. 2005. Autonomous robotic vehicle development for greenhouse spraying. Transactions of the ASAE. Vol. 48(6): 2355−2361.
14- Stombaugh, T. S., and Shearer, S. A. 2001. DGPS-based guidance of high-speed application equipment. ASAE Paper No. 011190. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Design, fabrication and evaluation of a mobile robot for greenhouse spraying

Hassan Masoudi[1], Reza Alimardani[2], Mahmoud Omid[2], Seyed Saeid Mohtasebi[3], Saeid Bagheri Shooraki[4]

1. *Assistant professor of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization Department, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email:* hmasoudi@scu.ac.ir
2 , 3. *Associate professors and professor of Agricultural Machinery Engineering Department, University of Tehran, Karaj, Iran.*
4. Associate professor of Electrical Engineering Faculty, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

ABSTRACT

In recent years, many researches are carried out to develop robots for agricultural applications. By using the robots, it is possible to reduce human exposure to pesticide application risk. The aim of this research is the automatic spraying of plants in greenhouses. So on this basis the following objectives were selected:

- Design and manufacture of a base vehicle which can act as a sprayer inside greenhouses.

- Develop greenhouse field test procedures and conduct the tests at different paths to evaluate the vehicle guidance and spraying performances.

A three-wheel differential steering vehicle was designed and built to act as a greenhouse sprayer. Power was transmitted from two DC motors to two driver wheels through a gearbox and shaft system. A proportional controller was developed and tested for controlling the left and right motors, which navigate the vehicle through the aisle way using range information provided by ultrasonic sensors.

After design and fabrication, the robot was tested on concrete surfaces using three speeds (15, 25 and 35 cm/sec) inside a greenhouse along a U-shaped path with 98 cm width. Also the spraying, safety and obstacle detection units of the vehicle were evaluated at this greenhouse. Tests results showed that the average of RMSE of the vehicle position was between 4.93 and 6.51 cm at different speeds. By increasing the speed, RMSE of the vehicle position increased. The performance of safety and central station units of the vehicle were acceptable. The accuracy of spraying unit in “spraying” was 99.47 % and in “not-spaying” was 99.92 % that are acceptable for greenhouse applications

Key words: Mobile robot, Ultrasonic sensor, Proportional control, Greenhouse, Spraying.