مجله تحقیقات مهندسی کشاورزی/جلد ۱۲/ شماره ۲/سال ۱۳۹۰/ص ۱۰۰-۸۷

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

حسن مسعودی*، رضا علیمردانی، محمود امید، سید سعید محتسبی و سعید باقری شورکی**

*نگارنده مسئول: اهواز- دانشگاه شهید چمران- دانشکده کشاورزی- گروه مهندسی مکانیک ماشین های کشاورزی و مکانیزاسیون ، تلفن: ۰۹۱۲۴۶۳۲۹۴۴، پیام نگار: hmasoudi@scu.ac.ir

**به‌ترتیب: استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون دانشگاه شهید چمران اهواز؛ استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران؛ استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران؛ استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه تهران و دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف

تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۸۹/۱۱/۲

چکیده

وجود عملیات سخت و طولانی در بخش کشاورزی و اهمیت انجام صحیح هر یک از این عملیات که مستقیماً بر کیفیت و کمیت محصولات این بخش اثرگذار است، لزوم استفاده از تجهیزات مکانیزه و خودکار را امری بدیهی می‌نماید. هدف اصلی از این تحقیق، خودکار کردن عملیات سمپاشی گلخانه‌ها به کمک یک وسیله نقلیه خودکار بوده که برای تحقق این هدف یک روبات متحرک ساخته شد و مورد ارزیابی قرار گرفت. دستگاه 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 شده است.

آزمون‌های عملی در یک گلخانه در داخل راهروهایی با عرض ۰/۹۸ متر به منظور ارزیابی عملکرد روبات در پیمودن یک مسیر U شکل روی سطح سیمانی و همچنین ارزیابی عملکرد واحد سمپاشی آن انجام شد. برای تعیین میزان انحراف روبات از مسیر واقعی در آزمون‌های گلخانه‌ای 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 ۰/۱۵ متر بر ثانیه، ٤/۹۳ سانتی‌متر و بیشترین مقدار آن در سرعت ۰/۳۵ متر بر ثانیه، برابر ٦/٥١ سانتی‌متر 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. 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 به‌دست آمد.

واژه‌های کلیدی

حسگر فراصوتی، روبات متحرک، سمپاشی، کنترل تناسبی، گلخانه

مقدمه

اصولاً هدف از تحقیقات در زمینه روباتیک طراحی و ساخت ماشین‌های 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

شاخه‌های علوم چندین دهه است که در دنیا در حال انجام است و تا کنون نیز محققان به موفقیت‌های فراوانی در ساخت روبات‌ها دست یافته‌اند. تعداد تحقیقات انجام شده و در حال انجام جهت ساخت روبات‌هایی برای استفاده در بخش صنعت بیشتر از بخش کشاورزی بوده است. در کشور ما نیز با وجود تحقیقات بسیار در زمینه ساخت روبات‌های صنعتی، تحقیقات بسیار اندکی در زمینه طراحی و ساخت روبات‌هایی 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 به‌کارگیری ماشین‌های مرسوم کشاورزی در این بخش نیز شده است. اما با روند شدید کاهش نیروی کار در بخش کشاورزی ایران از یکسو و افزایش تقاضا برای مواد غذایی از سوی دیگر لزوم به‌کارگیری تجهیزات مکانیکی خودکار در بخش کشاورزی ایران بر کسی پوشیده نیست. یقیناً در آینده‌ای نزدیک با پیوستن ایران به سازمان تجارت جهانی، استفاده از ماشین‌ها 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 همچون کشورهای پیشرفته دنیا، به‌کارگیری اتوماسیون و روبات‌ها در بخش کشاورزی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

محققان زیادی در نوشته‌های خود کاربرد وسایل نقلیه خودکار در بخش کشاورزی را گزارش کرده‌اند. در اینجا به بعضی از کارهای انجام شده در این زمینه اشاره می‌شود. شین و کیم (Shin & Kim, 2001) سیستم هدایت خودکار برای یک سمپاش کوچک باغی را با به‌کارگیری اهداف لوله استیل ضدزنگ جهت انعکاس امواج فراصوتی به سمت حسگرهای فراصوتی توسعه دادند. میسائو (Misao, 2001) ماشین بینایی را برای سیستم فرمانگیری خودکار با استفاده از تخته‌های هدف قرمز رنگ، جهت هدایت یک سمپاش برقی به‌کار گرفت. یک دوربین ویدئویی جهت گرفتن تصویر از مسیر حرکت شامل اهداف قرمز رنگ استفاده شد. الگوریتم‌های پردازش تصویر فاصله از موقعیت کنونی وسیله نقلیه تا هدف را تعیین می‌کردند و سپس موقعیت واقعی تا مسیر تعریف شده وسیله نقلیه مقایسه شد و از طریق یک سیستم کنترل فرمانگیری خودکار اصلاح شد. استومباغ و شیئرر (Stombaugh & Shearer, 2001) یک سیستم هدایت خودکار بر مبنای DGPS را برای کنترل فرمانگیری خودکار یک وسیله نقلیه پرسرعت پاشنده مواد شیمیایی توسعه دادند. گیرنده DGPS بازخورد موقعیت را فراهم می‌کرد، درحالی‌که یک سوپاپ کنترل مستقیم سولونوئیدی عمل فرمانگیری را انجام می‌داد. دانیل و پارسونز (Daniel & Parsons, 2003) روی یک سیستم کنترل دبی خروجی با استفاده از شیر کنترل PWM روی سمپاش‌های بوم‌دار کار کردند که بر اساس سرعت واقعی چرخ سمپاش، خروجی سم را تنظیم و کنترل می‌کرد. شریعتی (Shariati, 2004) نمونه بازوی مکانیکی روبات جهت تشخیص میوه در یک مسیر خاص را طراحی کرده و ساخت. مساح (Massah, 2004) در تحقیق خود دستکار[1] و کارگیر[2] ماشین هرس روباتیک مجهز به سیستم کنترل نیرو را برای هرس درختچه‌های پارک‌ها، طراحی نموده و ساخت. آق خانی و عباسپور فرد (Aghkhani & 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 روی مسیر حرکت مطلوب و روی سطح خاک قرار داده می‌شد. 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 دیسک‌های فولادی حاوی جریان الکتریکی حس نموده و انحراف تراکتور از راستای حرکت را به‌صورت خودکار اصلاح می‌کرد.

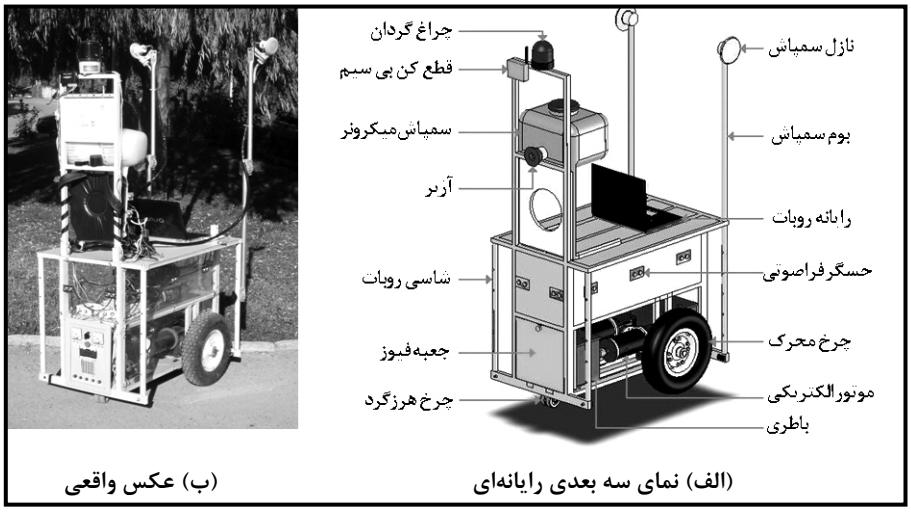
1- Manipulator
2- End effectors

هدف از این تحقیق انجام عملیات سمپاشی گلخانه‌ها به صورت کاملاً خودکار می‌باشد که برای تحقق این هدف یک سیستم هدایت خودکار طراحی شد و روی یک وسیله نقلیه کوچک (روبات متحرک) به منظور هدایت و کنترل خودکار آن در یک مسیر از پیش تعیین‌شده داخل گلخانه پیاده‌سازی گردید. در این مقاله ابتدا واحدهای مختلف تعبیه‌شده در روبات و اجزای سخت‌افزاری و نرم‌افزاری آن توضیح داده می‌شوند و در ادامه نتایج آزمایشات انجام شده برای ارزیابی عملکرد سامانه هدایت خودکار روبات و واحد سمپاشی آن بیان می‌شود.

مواد و روش‌ها

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 (۲۴ ولت و ۵۰۰ وات با ۱۵۰۰ دور در دقیقه) مشابه است که در دو سمت چپ و راست آن نصب شده‌اند و روبات برای رانش و فرمانگیری از آنها استفاده می‌کند. نوع فرمانگیری روبات دیفرانسیلی[1] است که برای حرکت مستقیم هر دو موتور با سرعت یکسان می‌چرخند 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 می‌یابد. شکل۱(الف) نمای سه‌بعدی رایانه‌ای و شکل۱(ب) تصویر واقعی روبات ساخته شده را نشان می‌دهند. تمامی قطعات و اجزای مکانیکی روبات در محیط نرم‌افزار Solid Works 2003 طراحی شدند.

این سیستم توانایی آن را دارد که روبات را داخل یک گلخانه از نقطه‌ای به نقطه دیگر به‌طور خودکار هدایت کند، تا عملیات سمپاشی محصولات انجام شود. البته این روبات قابلیت آن را دارد که با نصب تجهیزات مربوطه جهت انجام سایر عملیات مانند دیده‌بانی، جمع‌آوری پارامترهای محیطی و رشد گیاهان، آبیاری، جابجایی گلدان‌ها و غیره نیز به‌کار رود، ولی از آنجایی‌که انجام عملیات سمپاشی توسط انسان، در محیط بسته همچون گلخانه، خطرات زیادی را برای وی به همراه دارد، لذا به‌نظر می‌رسد خودکار کردن عملیات سمپاشی نسبت به سایر عملیات مربوط به تولید محصولات گلخانه‌ای از اولویت بالاتری برخوردار است، بنابراین سمپاشی به‌عنوان عملیات کاری اصلی در این تحقیق انتخاب شد.



شکل ۱- تصاویر رایانه‌ای و واقعی و اجزای مختلف روبات ساخته شده

1- Differential Steering

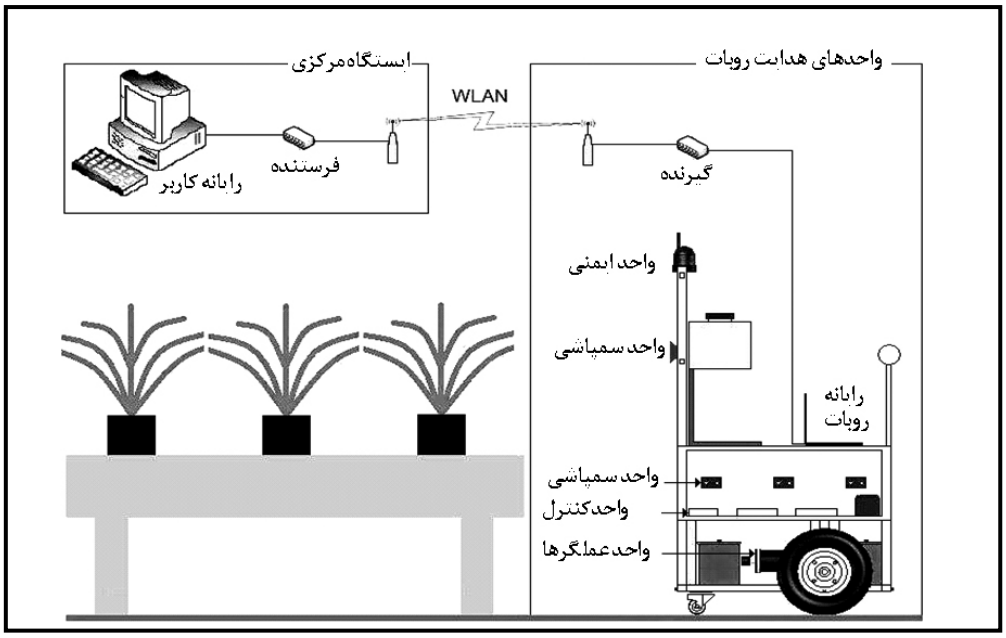
اجزای روبات

اجـزای روبـات شـامل دو بخـش اصـلی اسـت؛ بخـش سخت‌افزاری و بخش نرم‌افزاری بود.

بخش سخت‌افزاری از واحدهای زیـر تـشکیل شـده اسـت: ایـستگاه مرکـزی، واحـد کنتـرل، واحـد حـسگرها، واحـد عملگرها، واحد ایمنی، واحد سمپاشی، و شاسی و بدنه.

بخش نرم‌افزاری نیز شامل نـرم‌افزارهـای مـورد نیـاز بـرای هدایت خودکار روبات می‌باشند. سه برنامه رایانه‌ای جـامع با استفاده از زبـان برنامـه‌نویـسی ویـژوال C^{++} و در محـیط کمپایلر Visual Studio 2008 برای پیـاده‌سـازی و اجـرای الگوریتم‌های سیـستم هـدایت خودکـار روبـات و برقـراری ارتباط با کاربر نوشته شد کـه عبارتنـد از؛ برنامـه رایانـه‌ای میکروکنترلر، نرم‌افزار رایانه روبات، و نرم‌افزار رایانه کاربر.

کنترل و نظـارت کـاربر بـر عملکـرد روبـات از طریـق نرم‌افزارهای سیستم هدایت خودکار روبات میسر می‌شـود. این نرم‌افزارها رابط بین کاربر و روبات هستند. یکی از این نرم‌افزارها در ایستگاه مرکزی روی رایانـه کـاربر و دیگـری روی رایانـــه روبـــات نـــصب گردیـــد. برنامـــه رایانـــه‌ای میکروکنترلـر نیـز در درون حافظـه فلـش[1] میکروکنترلـر ریخته شد.



شکل ۲- نمای کلی و واحدهای مختلف روبات متحرک ساخته شده

شـکل ۲ واحـدهای مختلـف روبـات و نحـوه ارسـال اطلاعات از ایستگاه مرکـزی بـه واحـدهای دیگـر را نـشان می‌دهد. کاربر از طریق رایانه کاربر در ایستگاه مرکـزی بـا رایانه روبات مستقر در روی آن، از طریق یک صفحه رابـط گرافیکی کاربر[2] مشخصات مـسیر (شـامل تعـداد راهروهـا، طول و عرض هر راهرو، فاصـله بـین دو راهـروی مجـاور و جهت دور زدن در انتهای راهروی اول) و عملیات مورد نظر را تعیین می‌کند. وقتی که کاربر یک ماموریـت را تعریـف

1- Flash memory
2- Graphical User Interface(GUI)

نمود، می‌تواند دستور شروع ماموریت را صادر کند. دستورات صادر شده از طرف کاربر از طریق یک شبکه بی‌سیم محلی[1] به کمک فناوری WiFi به روبات ارسال می‌گردد. همچنین مقادیر پارامترهای سمپاشی و کاری روبات نیز به‌صورت لحظه‌ای به ایستگاه مرکزی ارسال می‌شود تا کاربر بتواند نظارت و کنترل دقیقی بر کارکرد روبات داشته باشد.

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 ردیف‌های محصول در ابتدای ردیف محصول شیر کنترل جریان سم را باز نموده و سمپاشی شروع می‌شود و با رسیدن روبات به انتهای هر ردیف شیر کنترل جریان سم را قطع می‌کند. واحد سمپاشی از اجزای سخت‌افزاری زیر تشکیل شده است:

- سمپاش میکرونر بومدار با کلیه تجهیزاتش؛
- حسگر فشارسنج: در واحد سمپاشی از یک حسگر برای اندازه‌گیری فشار محلول سم در لوله خروجی سمپاش استفاده شد. این حسگر، فشار محلول سم در لوله خروجی سمپاش را نشان می‌دهد.
- 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 (۱۲ ولت مدل CEME ساخت چین)، یک عدد پمپ کوچک (۶ ولت)، دو عدد نازل میکرونر (۶ ولت با سرعت دورانی ۲۰۰۰ دور در دقیقه).

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

- هنگام دور زدن روبات در انتهای ردیف‌های محصول؛
- در موقع خالی شدن مخزن سم؛
- در مواقع توقف روبات به هر دلیلی از جمله برخورد با یک مانع.

سیستم هدایت خودکار روبات

با توجه به هدف تعیین شده، روبات بایستی بتواند درون گلخانه، راهروی بین دو ردیف گلدان‌ها را تشخیص داده و در آن حرکت کند. در اکثر گلخانه‌ها از یک سکو یا میز و یا پایه‌های فلزی برای نگهداری گلدان‌ها استفاده می‌شود که می‌توان از لبه آنها به‌عنوان خطوط هادی روبات بهره برد. مطابق شکل ۳ لبه‌های ردیف گلدان‌ها به‌عنوان خطوط هادی و خط مرکزی راهرو نیز که به موازات ردیف گلدان‌ها قرار دارد، به‌عنوان خط هدف در نظر گرفته شد. این روبات از دو روش برای تولید سیگنال‌های هادی استفاده می‌کند. در بین ردیف‌های محصول از ۶ عدد حسگر فراصوتی (USS3, Best Technology Co., Japan) نصب شده در دو طرف روبات و در خارج از ردیف محصول‌ها و نیز انتهای ردیف‌ها برای دور زدن از روش تخمین مسافت استفاده می‌کند.

1- Wireless Local Area Network(WLAN)

شکل۳- نمایش خطوط هادی و خط هدف در یک گلخانه پرورش گل

نحوه هدایت خودکار روبات درون راهروهای گلخانه

برای هدایت خودکار روبات درون 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 داده‌های حسگرهای فراصوتی تعیین شده و به واحد کنترل ارسال می‌گردد. زاویه فرمانگیری روبات یک پارامتر میانی است که پارامترهای ورودی (جهت و موقعیت روبات) را به پارامترهای خروجی (ولتاژهای چپ و راست) مرتبط می‌سازد. درون راهروها با استفاده از ساختار روبات، مقدار زاویه فرمانگیری بر اساس مقادیر جهت و موقعیت روبات محاسبه شد، که تابع تبدیل به‌دست آمده یک تابع غیرخطی به صورت رابطه ۱ می باشد:

$$\phi = -(\theta + tg^{-1}(\frac{e}{L})) \qquad (1)$$

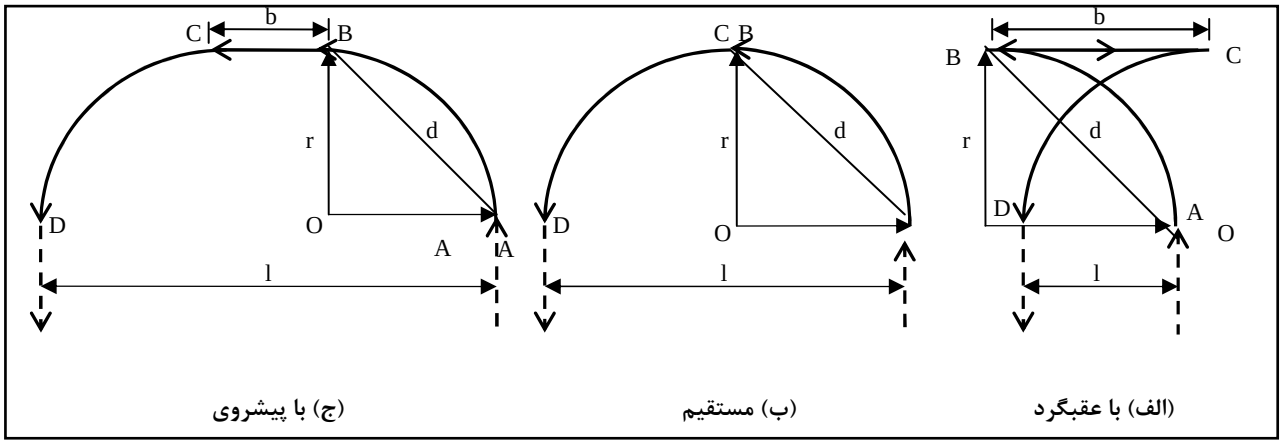
(e, θ → φ)

واحد کنترل بر اساس مقدار زاویه فرمانگیری به‌دست آمده سیگنال‌های لازم را برای چرخش موتورهای محرک روبات تولید می‌نماید.

نحوه دور زدن روبات در انتهای راهروها

برای دور زدن روبات در انتهای راهروها می‌توان از الگوریتم‌های مختلفی استفاده نمود. ولی با توجه به اینکه در محیط گلخانه فضای زیادی در انتهای راهروها برای دور زدن روبات وجود ندارد، لذا از الگوریتم سه فرمانه برای دور زدن استفاده شد (Kise *et al.*, 2002). مسیر حرکت روبات با استفاده از این الگوریتم در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در این الگوریتم برای چرخش به نزدیکترین راهرو در سمت چپ (یا راست) راهروی کنونی، روبات به ترتیب زیر عمل می‌کند:

- حرکت رو به جلو از انتهای راهروی مبدأ و چرخش به سمت چپ (یا راست) با حداکثر زاویه فرمانگیری به اندازه ۹۰ درجه
- بسته به فاصله بین دو راهروی مجاور در گلخانه، حرکت مستقیم به سمت عقب یا جلو با زاویه فرمانگیری صفر به اندازه مسافتی که متناسب با فاصله دو راهروی مجاور از یکدیگر و شعاع دور زدن روبات در مرحله اول است.
- چرخش مجدد به سمت چپ (یا راست) با حداکثر زاویه فرمانگیری به اندازه ۹۰ درجه و رسیدن به ابتدای راهروی مقصد.



شکل ٤- مسیر دور زدن روبات در الگوریتم سه فرمانه

در شکل ۴، A نقطه شروع دور زدن و D نقطه پایان دور زدن و BC مسیر عقبگرد[1] یا پیشروی[2] می‌باشد. در این الگوریتم مسافت عقبگرد یا پیشروی از روی شعاع دور زدن روبات و فاصله دو راهروی مجاور از یکدیگر از رابطه ۲ محاسبه می‌شود. متغیر بودن شعاع دور زدن و فاصله دو راهروی مجاور از یکدیگر تأثیری بر دقت کار ندارد.

$$b = l + 2(r - l) = 2r - l \quad (۲)$$

که در آن،

b= فاصله عقبگرد یا پیشروی (متر)؛ l= فاصله دو راهروی مجاور از یکدیگر (متر)، r= شعاع دور زدن روبات (متر)؛ و d= طول وتر مسیر چرخش روبات (متر) می‌باشد. اگر مقدار b منفی باشد، روبات به اندازه آن به سمت عقب حرکت می‌کند (شکل۴ الف)، اگر صفر باشد هیچگونه حرکت مستقیمی ندارد (شکل۴ ب) و این بدان معناست که فاصله بین دو راهروی مجاور به اندازه دو برابر شعاع دورزدن روبات می‌باشد، به‌طوری‌که روبات با یک چرخش ۱۸۰ درجه‌ای در مسیر بعدی قرار می‌گیرد. اگر مقدار b مثبت باشد، بایستی روبات به اندازه آن به سمت جلو حرکت کند (شکل۴ ج).

آزمون‌ها و ارزیابی‌ها

پس از ساخت اجزای مختلف روبات، سیستم هدایت خودکار طراحی‌شده، روی آن پیاده‌سازی گردید و سپس روبات داخل یک گلخانه مورد ارزیابی و آزمون قرار گرفت تا کارآیی اجزاء و واحدهای مختلف آن مشخص شود.

ارزیابی عملکرد سیستم هدایت خودکار روبات در گلخانه

روبات به گلخانه‌ای 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 ۰/۹۲ متر و به طول ۱۷/۹۴ متر با عرض راهروهای ۰/۹۳ تا ۱/۲۲ متر بود. عرض راهروهای منتخب برای ارزیابی روبات ۰/۹۸ متر و طول آنها ۱۳/۹۴ متر و فاصله جانبی آنها از یکدیگر ۳/۸۲ متر بود. در این گلخانه عملکرد روبات در پیمودن مسیر U شکل در سه سرعت پیشروی

1- Backward distance
2- Forward distance

۰/۱۵، ۰/۲۵، و ۰/۳۵ متر بر ثانیه با کنترلر تناسبی (رابطه ۱) و در پنج تکرار در هر سرعت ارزیابی گردید.

در این آزمون‌ها، کارآیی حسگرهای تشخیص مانع در تشخیص به‌موقع موانع و عدم برخورد روبات با آنها و همچنین هدایت روبات به‌صوت کنترل از راه دور از طریق رایانه کاربر در ایستگاه مرکزی که با رایانه روبات تبادل اطلاعات می‌نمود، نیز ارزیابی شد. بعد از انجام آزمون‌ها میزان انحراف روبات از مسیر واقعی در سرعت‌های پیشروی مختلف تعیین گردید. شکل ۵ روبات را حین ارزیابی، در گلخانه نشان می‌دهد.

شکل ۵- ارزیابی روبات درون گلخانه

ارزیابی عملکرد واحد سمپاشی روبات

عملکرد واحد سمپاشی روبات از نظر باز و بسته کردن به‌موقع شیر کنترل جریان در آزمون‌های انجام شده در درون گلخانه مورد ارزیابی قرار گرفت. در ابتدای مسیر حرکت (نقطه A) روبات روشن شده و با پیمودن راهروی اول درون آن اقدام به سمپاشی گلدان‌های دو طرف راهرو بر روی سکوها می‌کرد و با رسیدن به انتهای راهروی اول در حین چرخش ۱۸۰ درجه‌ای و رفتن روبات به درون راهروی دوم عملیات سمپاشی قطع می‌شد. مجدداً در ابتدای راهروی دوم سمپاشی شروع شده و با رسیدن روبات به انتهای مسیر تعریف شده در انتهای راهروی دوم (نقطه B) ضمن توقف کامل روبات عملیات سمپاشی نیز قطع می‌شد. البته در مسیر منتخب در دو محل راهروهای جانبی وجود داشت که در حین عبور روبات از جلوی این راهروهای جانبی نیز عملیات سمپاشی می‌بایست قطع می‌گردید. در عمل در زمان حرکت روبات از ابتدا تا انتهای مسیر حرکت، عملیات کاری انجام شده به‌صورت 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 می‌شد، تعداد نقاطی که نبایستی سمپاشی انجام می‌شد، 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.

تجزیه و تحلیل آماری نتایج آزمون‌ها

برای تعیین میزان انحراف روبات از مسیر واقعی در آزمون‌های گلخانه‌ای روبات از شاخص آماری RMSE[2] استفاده شد که از رابطه ۳ محاسبه می‌گردد:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \frac{e_i^2}{n}} \qquad (۳)$$

که در آن،

e= مقدار انحراف روبات از خط مرکزی راهرو در هر نقطه (در واقع همان مقدار موقعیت جانبی روبات بر حسب سانتی‌متر)؛ و n= تعداد نقاط داده برداری شده در طول مسیر حرکت روبات است (Cho & Ki, 1999; Singh *et al.*, 2005). در تمامی آزمون‌های گلخانه‌ای روبات مقدار RMSE برای همه حالت‌ها و سرعت‌های پیشروی محاسبه شد و بر اساس مقادیر آن بهترین شرایط برای هدایت خودکار روبات تعیین گردید. عملیات آماده‌سازی داده‌ها، تعیین مقادیر و تجزیه و تحلیل نتایج توسط نرم‌افزار Microsoft Excel 2003 انجام شد.

نتایج و بحث

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 سرعت‌های ۰/۱۵، ۰/۲۵، و ۰/۳۵ متر بر ثانیه در جدول ۱ آمده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی روبات مقدار میانگین RMSE نیز افزایش یافته‌است. حداقل مقدار میانگین RMSE در سرعت ۰/۱۵ متر بر ثانیه و برابر ۴/۹۳ سانتی‌متر و بیشترین مقدار آن در سرعت ۰/۳۵ متر بر ثانیه و مساوی ۶/۵۱ سانتی‌متر بوده است. همچنین در این جدول مقادیر کمینه، بیشینه، میانگین و انحراف معیار (SD) انحراف جانبی روبات در تکرارها و سرعت‌های مختلف آورده شده است. حداکثر مقدار انحراف جانبی روبات در سرعت ۰/۳۵ متر بر ثانیه و مساوی ۱۶ سانتی‌متر بود.

با توجه به اینکه در این حالت میانگین مقدار RMSE در تمامی سرعت‌ها کمتر از هفت سانتی‌متر است، لذا هدایت روبات نوسانات و انحرافات جانبی کمی را ایجاد می‌کند و قابل قبول است. در نتیجه می‌توان روبات را با کنترلر تناسبی درسرعت‌های کمتر از ۰/۳۵ متر بر ثانیه راه‌اندازی کرد.

1- Confusion matrix

2- Root Mean Square Error(RMSE)

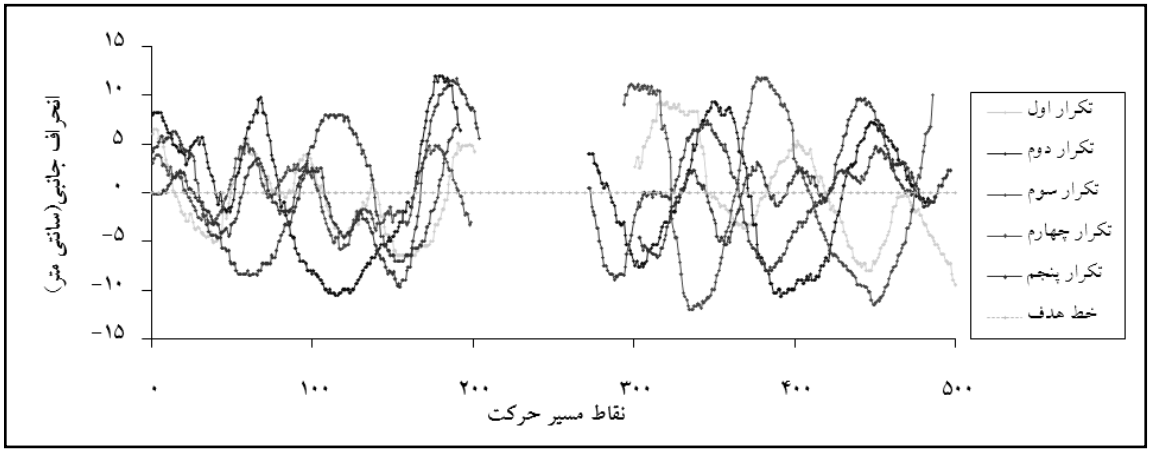
جدول ۱- مقادیر انحراف روبات از خط هدف در درون گلخانه در سرعت‌های مختلف*

تکرار	انحراف جانبی (سانتی‌متر)	سرعت پیشروی روبات (متر بر ثانیه)		
		۰/۱۵	۰/۲۵	۰/۳۵
اول	RMSE	۳/۹۷	۴/۴۹	۵/۲۴
	میانگین	۰/۳۰	-۰/۴۱	۰/۴۶
	SD	۳/۹۶	۴/۴۸	۵/۲۳
دوم	RMSE	۶/۹۸	۶/۴۱	۵/۶۱
	میانگین	۰/۸۸	-۰/۳۰	-۰/۰۶
	SD	۶/۹۳	۶/۴۱	۵/۶۱
سوم	RMSE	۴/۱۱	۵/۰۲	۸/۴۸
	میانگین	۰/۴۶	-۰/۵۹	-۰/۸۱
	SD	۴/۰۹	۴/۹۹	۸/۴۴
چهارم	RMSE	۵/۳۳	۶/۱۵	۶/۱۰
	میانگین	-۰/۱۷	-۰/۲۶	-۰/۲۲
	SD	۵/۳۳	۶/۱۵	۶/۱۱
پنجم	RMSE	۴/۲۵	۴/۶۱	۷/۱۰
	میانگین	۰/۸۷	۰/۴۷	-۱/۵۲
	SD	۴/۱۷	۴/۶۰	۶/۹۴
	میانگین RMSE	۴/۹۳	۵/۳۴	۶/۵۱

*مقادیر مثبت بیانگر انحراف به راست (از خط مرکزی راهرو) و مقادیر منفی انحراف به چپ می‌باشند.

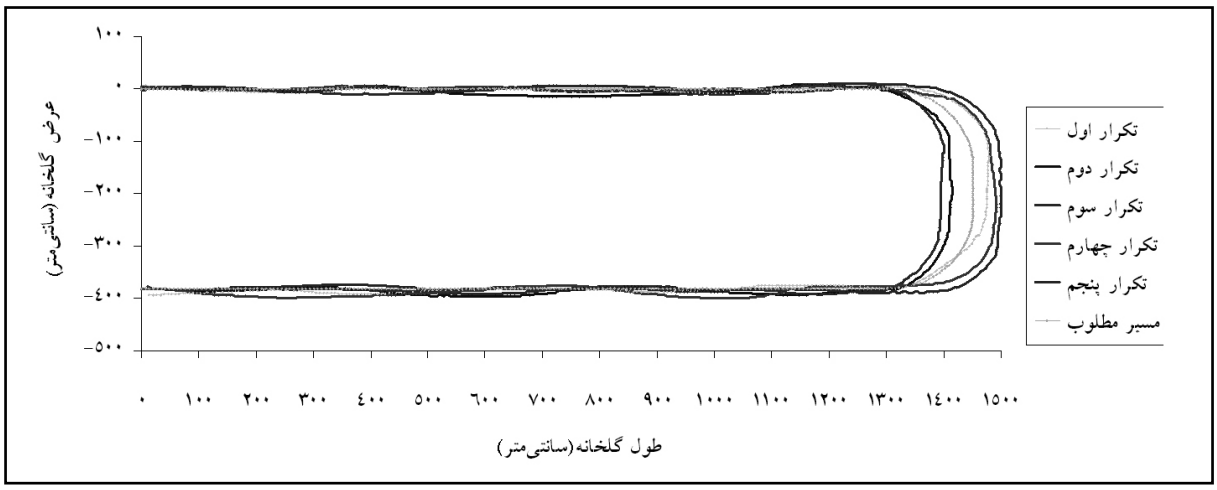
نمودارها در شکل ۶ میزان انحراف روبات از خط هدف در گلخانه در سرعت پیشروی ۰/۲۵ متر بر ثانیه و تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد. فضای خالی موجود در قسمت میانی این نمودارها، محل دور زدن روبات است و مسیرهای دو طرف فضای خالی، مسیر حرکت روبات در درون راهروی اول و راهروی دوم مسیر U شکل تعریف شده است. مطابق داده‌های جدول ۱ 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 & Burks, 2002) با افزایش سرعت پیشروی وسیله نقلیه خودرو از ۱/۰۸ متر بر ثانیه تا ۱/۸۴ متر بر ثانیه مقدار میانگین RMSE فاصله حسگرهای فراصوتی از توده درختان از ۱۰/۶۷ سانتی‌متر به ۱۹/۳۳ سانتی‌متر 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. به‌گونه‌ای که در سرعت ۰/۳۶ متر بر ثانیه مقدار RMSE انحراف جانبی ۲۱ سانتی‌متر و در سرعت ۱/۴۳ متر بر ثانیه مقدار آن ۱۱۲ سانتی‌متر به‌دست آمد. شکل ۷ مسیرهای واقعی دور زدن روبات در انتهای راهروی گلخانه با سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه و در تکرارهای مختلف را نشان می‌دهد.



شکل٦- میزان انحراف روبات از خط هدف در گلخانه (سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه)

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 ایده‌آل دور زدن افزایش می‌یابد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سرعت پیشروی روبات، شعاع دوران و در نتیجه فضای مورد نیاز برای دور زدن روبات در انتهای راهرو افزایش می‌یابد. این موضوع نیز کاملاً با قوانین پایه فیزیکی مطابقت دارد.

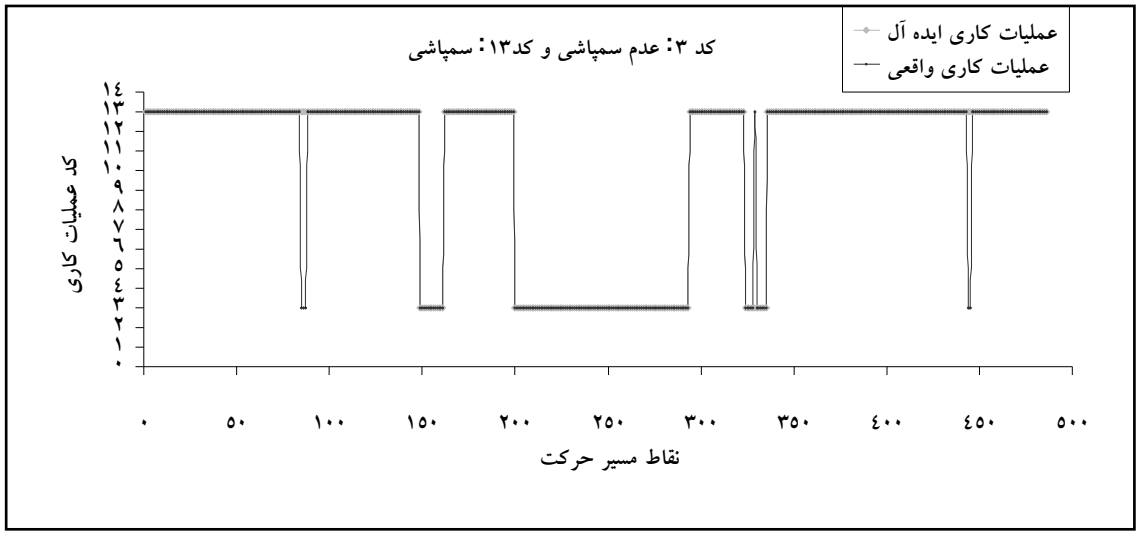


شکل ۷- مسیرهای دور زدن روبات در انتهای راهروی گلخانه (سرعت ۰/۲۵ متر بر ثانیه)

نتایج ارزیابی عملکرد واحد سمپاشی روبات

نمودار شکل ۸ نمونه‌ای از نمودارهای عملیات کاری روبات را نشان می‌دهد. 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 می‌شود که میانگین دقت واحد سمپاشی در "سمپاشی" ۹۹/۴۷ درصد و در "عدم سمپاشی" ۹۹/۹۲ درصد و در کل ۹۹/۶۹ درصد است. این مقادیر دقت بیانگر آن است که واحد سمپاشی روبات به‌خوبی عمل نموده است و روبات ساخته شده از دقت قابل قبول و بالایی در سمپاشی گلخانه‌ها برخوردار است.



شکل۸- نمونه‌ای از نمودارهای عملیات کاری روبات (تکرار پنجم)

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

تکرار ◁ / نوع عملیات ▽	اول	دوم	سوم	چهارم	پنجم	ششم	هفتم	هشتم	نهم	دهم	میانگین
سمپاشی	۹۹/۵۴	۹۹/۲۶	۹۹/۷۵	۹۹/۵۲	۹۸/۶۴	۹۹/۸۰	۹۹/۸۳	۱۰۰	۹۹/۳۹	۹۹/۰۱	۹۹/۴۷
عدم سمپاشی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۱۶	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۹۹/۹۲
کل	۹۹/۶۴	۹۹/۴۵	۹۹/۸۱	۹۹/۶۳	۹۸/۷۷	۹۹/۸۶	۹۹/۸۸	۱۰۰	۹۹/۵۶	۹۹/۲۸	۹۹/۶۹

نتیجه گیری

به‌طور خلاصه از آزمون‌های انجام شده در این تحقیق و مطالب بیان شده می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- در این تحقیق یک روبات متحرک ساخته شد که قادر است به‌صورت خودکار در درون راهروهای گلخانه حرکت نموده و عملیات سمپاشی را انجام دهد.

۲- با افزایش سرعت پیشروی روبات، مقدار انحراف جانبی آن از مسیر اصلی، شعاع دوران و درنتیجه فضای مورد نیاز برای دور زدن روبات در انتهای راهرو افزایش می‌یابد.

۳- دقت واحد سمپاشی روبات ۹۹/۶۹ درصد به‌دست آمد. لذا روبات از دقت قابل قبول و بالایی در سمپاشی گلخانه برخوردار است.

قدردانی

این مقاله از رساله دکتری نویسنده اول آقای حسن مسعودی با عنوان "طراحی و پیاده سازی یک سیستم هدایت خودکار برروی یک وسیله نقلیه کوچک به‌منظور انجام عملیات سمپاشی در درون گلخانه" استخراج شده است. از معاونین محترم پژوهشی دانشگاههای تهران و شهید چمران اهواز به‌خاطر حمایت‌های مالی از این طرح قدردانی می‌گردد.

مراجع

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 Eng. 103, 265–270.

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 Eng. 96(2): 139-149.

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

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.

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. July 26-27, 2002. Chicago, Illinois. USA. pp. 221-229.

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.

Kise, M., Zhang, Q. and Rovira-Más, F. 2005. A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. Biosystems Eng. 90(4): 357-367.

Massah, J. 2004. Design, fabrication and evaluation of a robotic cultivating manipulator and end effectors with force control system. Ph. D. Thesis. Department of agricultural machinery engineering. Faculty of agriculture. Tarbiat Modares University. Tehran. Iran. (in Farsi)

Misao, Y. 2001. An image processing based automatic steering power system. ASAE Paper No. 013106. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Shariati, S.I. 2004. Design and fabrication of a prototype manipulator for fruit detection in a special path. M. Sc. Thesis. Department of agricultural machinery engineering. College of agriculture. University of Tehran. Karaj. Iran. (in Farsi)

Shin, B. and Kim, S. 2001. Autonomous guidance system for small orchard sprayer with ultrasonic sensors. ASAE Paper No. 011193. St. Joseph, Mich.: ASAE.

Singh, S., Burks, T.F. and Lee, W.S. 2005. Autonomous robotic vehicle development for greenhouse spraying. T. ASAE. 48(6): 2355−2361.

Stombaugh, T.S., and Shearer, S.A. 2001. DGPS-based guidance of high-speed application equipment. ASAE Paper No. 011190. St. Joseph, Mich.: ASAE.

AERI JAER *Journal of Agricultural Engineering Research/Vol.12/No.2/2011/P: 87-100*

Design, Fabrication and Evaluation of a Mobile Robot for Spraying in Greenhouses

H. Masoudi *, R. Alimardani, M. Omid, S. S. Mohtasebi and S. Bagheri Shooraki

* Corresponding Author: Assistant Professor of Agricultural Machinery Engineering and Mechanization Department, Shahid Chamran University of Ahvaz.. Tel:09124632944. Email: hassanmasoudi@yahoo.com & hmasoudi@scu.ac.ir
Received: 10 May 2011, Accepted: 22 Jaunary 2011

In recent years, researchers have tried to develop robots for agricultural applications. Robots make it possible to reduce human exposure to pesticide application risk. The aim of this research was to develop an automated method of spraying of plants in greenhouses. A three-wheel differential steering vehicle was designed and constructed to act as the greenhouse sprayer. Power was transmitted from two DC motors to two drive wheels through a gearbox and shaft system. A proportional controller was developed and tested to control the left and right motors, which navigated the aisles using information provided by ultrasonic sensors. After design and fabrication, the robot was tested on concrete surfaces at 0.15, 0.25 and 0.35 m/s inside a greenhouse along a U-shaped path 0.98 m in width. Spraying, safety and obstacle detection units of the vehicle were evaluated. The tests results showed that the average RMSE of the vehicle position was between 4.93 and 6.51 cm at different speeds. Increasing the speed increased the RMSE of the vehicle position. The performances of the safety and central station units of the vehicle were acceptable. The accuracy of the spray function was 99.47% and the no-spray function was 99.92%, which are acceptable for greenhouse applications.

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