

تهیه نقشه دو بعدی محیط گلخانه به کمک بینایی استریو

امین نصیری^۱، حسین مبلی^{۲*}، سلیمان حسین پور^۳، شاهین رفیعی^۴

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران.

۲. استاد، دانشکده مهندسی و فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۳. استادیار، دانشکده مهندسی و فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

۴. استاد، دانشکده مهندسی و فناوری، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۶/۲۳ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۹/۱۶)

چکیده

ساخت نقشه دو بعدی محیط گلخانه با هدف کنترل خودکار به منظور انجام عملیاتی مانند آبیاری و سم پاشی، با مکان-یابی سکوهای کشت و گلدان‌ها امکان پذیر می‌باشد. با استخراج تصویر ناهمخوانی از جفت تصویر استریو و انتقال نقاط به فضای سه بعدی، مدل ابر نقطه‌ای محیط ایجاد و سپس با تصویر نمودن نقاط بر صفحه XZ و از کنار هم قرار دادن نقشه‌های محلی بر مبنای مکان‌یابی دیداری، نقشه دو بعدی محیط گلخانه تهیه شد. در این تحقیق به منظور شناسایی و تفکیک سکوهای کشت و گلدان‌ها از یکدیگر، تعیین موقعیت گوشه سکوها و محل قرارگیری گلدان‌ها به صورت تک نقطه دو بعدی، از مختصات سه بعدی اجزاء محیط استفاده شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوریتم معرفی شده، از مجموع طول سکوها، توانایی شناسایی $۱۰۰/۲۶$ متر، یعنی $۹۴/۰۵$ درصد از طول کل سکوها را دارد. همچنین $۸۳/۳۳$ درصد از گوشه‌های سکوها کشت با میانگین خطای $۰/۰۹$ متر و میانگین مربع خطای $۰/۰۰۹$ متر توسط الگوریتم ارائه شده، شناسایی شدند. از نقشه دو بعدی گلخانه نتیجه گرفته شد که الگوریتم معرفی شده توانایی تشخیص و تعیین موقعیت $۹۲/۱۰$ درصد از گلدان‌ها را با میانگین خطای $۰/۰۷$ متر و میانگین مربع خطای $۰/۰۰۶$ متر دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سکوی کشت، گلدان، مختصات سه بعدی، مکان‌یابی دیداری.

مقدمه

بشر در حال حاضر در حال ورود به دنیای مجازی است. در دنیای مجازی باید ابزاری برای مکان‌یابی اجزای محیط وجود داشته باشد. به این منظور از ردیاب‌های سه بعدی استفاده می‌شود تا بتوان اطلاعات بصری را با کیفیتی بالا شبیه‌سازی نمود. بینایی مهم‌ترین سامانه ارتباطی انتقال اطلاعات از محیط پیرامون می‌باشد و یکی از روش‌های بینایی سه بعدی، داشتن یک سامانه استریو است.

در سال‌های اخیر در زمینه کنترل خودکار، زیست شناسی و کشاورزی توجه خاصی به ماشین بینایی شده است. از سال ۱۹۹۰ در زمینه ماشین بینایی و رباتیک، نرم‌افزار و سخت-افزارهای بسیاری توسعه پیدا کرده‌اند و در این زمینه روش‌های عملی و قابل اعتماد مختلفی در بخش کشاورزی معرفی شده است، از جمله آن‌ها می‌توان به: سامانه‌های برداشت، سامانه

درجه‌بندی میوه، استفاده از بینایی برای مکان‌یابی ربات در گلخانه، سم پاشی، بازرسی و درجه‌بندی محصولات کشاورزی و کنترل علف‌های هرز اشاره کرد (Torii, 2000; Brosnan & Sun, 2002; Slaughter et al., 2008). در حال حاضر استفاده از فناوری ماشین بینایی و تکنیک‌های پردازش تصویر، کاربردهای گسترده‌ای در کشاورزی به ویژه در هدایت ربات و مکانیزم‌های خود هدایت‌شونده دارد. اگرچه در دو دهه گذشته، بینایی کامپیوتر و تکنیک‌های پردازش تصویر پیشرفت‌های چشم‌گیری داشته‌اند، اما به طور کلی دید سه بعدی نسبت به تصاویر معمولی دو بعدی نمایش دقیق‌تری از واقعیت ایجاد می‌کند (Bhatti, 2011). درک خصوصیات سه‌بعدی یک منظره واقعی و یافتن ویژگی‌های اجسام موجود در آن از مهم‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی در بینایی ماشین و کامپیوتر می‌باشد که توسط سامانه بینایی استریو انجام می‌شود. بینایی استریو به معنای توانایی استخراج عمق بر اساس تحلیل دو تصویر گرفته شده از زاویه‌های مختلف یک صحنه می‌باشد. مزیت اصلی بینایی استریو نسبت به بینایی یک چشمی توانایی آن در

مرحله بازسازی با در اختیار داشتن اجزای متناظر در تصاویر استریو و اطلاعات مربوط به دوربین‌ها، موقعیت سه بعدی اجزا به دست می‌آید.

نظارت بر وضعیت رشد محصول و هدایت وسیله نقلیه خودکار دو عملیات مهم و اساسی در کشاورزی دقیق می‌باشند. ارزیابی خودکار بصری از شرایط محصول به طور خاص پرمردگی شاخ و برگ و پارامترهای رشد، امکان تعیین میزان آب مورد نیاز جهت آبیاری، تصمیم‌گیری در ارتباط با استفاده از کودهای شیمیایی و تعیین مقادیر مواد حفاظتی گیاه را فراهم می‌کند (McCarthy *et al.*, 2010). به عنوان مثال اندازه‌گیری طول بند (فاصله بین اتصالات شاخه) بخشی از نظارت و کنترل تنش کم آبی پنبه می‌باشد. بینایی ماشین قادر است با هزینه و خطر کم-تر از لحاظ وارد آمدن آسیب‌های مکانیکی به محصول، ارزیابی خودکار شرایط گیاهان مختلف را انجام دهد. در زمینه نظارت بر وضعیت رشد محصول می‌توان به تحقیقی که در آن از بینایی استریو به منظور تخمین پارامترهای رشد محصول (حجم ردیف و ارتفاع آن) در فضای گلخانه استفاده شده، اشاره کرد. نتایج حاصل نشان داد که اندازه‌گیری خودکار ویژگی‌های هندسی در مقایسه با روش دستی، سریع‌تر می‌باشد، علاوه بر این امکان کنترل و ثبت روزانه پارامترها نیز با این روش فراهم می‌شود (Cantón *et al.*, 2012). در تحقیقی دیگر از بینایی استریو برای نظارت بر رشد کاهو استفاده گردید. در این تحقیق با استفاده از ویژگی‌های هندسی به دست آمده از سنجش بینایی استریو، منحنی رشد محصول استخراج شد (Yeh *et al.*, 2014).

جنبه‌های اصلی و ضروری برای هدایت خودکار شامل تشخیص موقعیت و جهت‌گیری ماشین‌های کشاورزی نسبت به ردیف محصول، شناسایی موانع و طراحی مسیر حرکت بین ردیف محصول می‌باشند. بینایی ماشین توانایی اجرای اهداف فوق، به منظور انجام عملیاتی مانند کاشت، سم پاشی و برداشت را دارد (Kise *et al.*, 2005; Rovira-Más *et al.*, 2008). به عنوان نمونه در یک مطالعه، از سامانه ماشین بینایی در کمباین ذرت استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که سامانه استفاده شده با دقت مطلوب می‌تواند موقعیت ردیف‌های محصول را تشخیص و در سرعت $1/3 \text{ ms}^{-1}$ هدایت کمباین را با سطح دقتی مشابه با سامانه موقعیت‌یاب جهانی^۳ انجام دهد (Benson *et al.*, 2003).

چالش اصلی در تعیین موقعیت وسیله، تخمین میزان جابه‌جایی آن است. تخمین میزان جابه‌جایی دوربین از جمله

شناسایی فاصله بین اشیاء واقعی و دوربین است. دوربین یک چشمی تصویر مسطحی ایجاد می‌کند که در آن هر پیکسل نتیجه افکنش^۱ دو بعدی جهان سه بعدی است. بینایی استریو با افزودن مختصات و یا بعد سوم به موضع محلی هر نقطه، یک مختصات دکارتی سه بعدی ایجاد می‌کند. نتیجه حاصل از حسگر بینایی استریو، توده‌ای از نقاط سه بعدی است که جزئیات صحنه را متناسب با وضوح تصاویر بدست آمده توصیف می‌کنند (Rosell & Sanz, 2012). ماشین بینایی به دلیل تشخیص غیر مخرب اهداف در یک صحنه دارای استفاده گسترده‌ای به عنوان حسگر می‌باشد و بینایی استریو اطلاعات یک صحنه سه بعدی را بدون نیاز به تعدد حسگرها و اندازه-گیری‌ها گردآوری می‌کند (Rovira-Más *et al.*, 2005; Kise & Zhang, 2008).

مسائل اصلی هر الگوریتم استریو عبارت است از: کالیبراسیون، یکسوسازی، انتخاب و استخراج اجزای تصویر، تطبیق و یافتن اجزای متناظر در جفت تصویر استریو و بازسازی (Trucco and Verri, 1998; Bradski and Kaehler, 2008).

کالیبراسیون دوربین فرایند تخمین پارامترهای داخلی و خارجی سامانه تصویربرداری است. به عبارت دیگر هدف از کالیبراسیون دوربین تعیین تمام پارامترهایی است که برای ایجاد ارتباط بین مختصات پیکسلی و مختصات یک نقطه در میدان دید دوربین ضروری می‌باشد. مرحله دوم الگوریتم استریو یکسوسازی می‌باشد. پیکربندی کاملاً هم تراز در یک سامانه استریو بسیار مشکل است چرا که تقریباً هیچ وقت دو دوربین دقیقاً هم صفحه و صفحات تصویر هم ردیف نیستند. در یکسوسازی، صفحات تصویر مجدد افکنش می‌شوند به طوری که آن‌ها دقیقاً در یک صفحه یکسان با ردیف‌های تصویری که به صورت مستقیم و موازی هم‌تراز شده‌اند، قرار گیرند. در مرحله سوم الگوریتم استریو، انتخاب و استخراج اجزا یا عناصر دو تصویر برای انطباق و تعیین اجزای متناظر انجام می‌شود. بر مبنای اجزای انتخاب شده، الگوریتم استریو به دو دسته کلی مبتنی بر ناحیه و مبتنی بر ویژگی تقسیم می‌شوند. قدم بعدی برای دستیابی به مختصات نقاط محیط، انطباق تصاویر راست و چپ می‌باشد. تطبیق یا تناظریابی بین اجزاء تصاویر استریو مهم‌ترین مرحله محاسبه الگوریتم استریو است. تطابق عبارت است از تعیین نقاط متناظر در دو تصویر. نتیجه فرآیند تطابق، نقشه تمایز^۲ قسمت‌هایی از تصویر است که منطبق شده‌اند. در

1 . Projection

2 . Disparity map.

3 .Global Positioning System (GPS).

موقعیت ساختارهای مختلف و وضعیت حرکتی وسیله برای ارسال اطلاعات به واحد کنترل را استخراج کرد. پارامتر اصلی در ایجاد یک نقشه میدانی از زمین‌های کشاورزی انتخاب یک حسگر مناسب برای ایجاد آن می‌باشد. در میان حسگرهای موجود مانند رادار و لیزر، سامانه‌های بینایی دارای توانایی بیش-تری برای ایجاد نقشه می‌باشند (Rovira-Más *et al.*, 2008). در این زمینه می‌توان به تحقیقی که در آن نقشه برداری سه بعدی از ردیف‌های محصول و مکان‌یابی آن‌ها به منظور هدایت تراکتور در مزرعه به کمک بینایی استریو انجام شد، اشاره کرد. نتایج تحقیق نشان داد که سامانه مورد نظر علاوه بر طراحی دقیق نقشه سه بعدی قادر به اندازه‌گیری تغییرات سه بعدی ارتفاع و حجم محصول می‌باشد (Kise & Zhang, 2008).

در حال حاضر بسیاری از ربات‌های زمین‌های کشاورزی و گلخانه‌ها توسط هدایت بصری کار می‌کنند و پژوهش‌های اخیر بر استفاده از بینایی استریو به منظور مکان‌یابی ربات، تشخیص اهداف در محیط کار ربات و تهیه نقشه متمرکز شده‌اند (Xia *et al.*, 2009). یکی از پارامترهای اصلی در هدایت خودکار ادوات کشاورزی شناسایی مسیر حرکت بین ردیف‌های محصول می‌باشد، در محیط گلخانه سکوه‌های کشت به نوعی ردیف محصول و اصلی‌ترین مانع در مقابل حرکت می‌باشند. از طرفی، سامانه‌های کشاورزی دقیق نیازمند ثبت محل محصول قبل از فرا رسیدن زمان انجام عملیات خاص کشاورزی می‌باشند. تعیین موقعیت و تهیه نقشه محل محصول، روشی موثر برای پیگیری توسعه پوشش‌های گیاهی و ابزارهای مناسب جهت سنجش پارامترهای مهم فیزیکی مانند اندازه و حجم محصول می‌باشند و اطلاعات مفیدی مانند فاصله و مختصات محصول، با هدف انجام عملیاتی همچون آبیاری و سم‌پاشی را ارائه می‌دهند (Rovira-Más *et al.*, 2005). بنابراین با شناسایی و تعیین موقعیت سکوه‌های کشت و گلدان‌ها، امکان تهیه نقشه محیط گلخانه فراهم می‌شود. به دلیل محدود بودن پژوهش‌های انجام شده در زمینه مکان‌یابی سکوه‌های کشت و گلدان‌ها به عنوان محل استقرار گیاه کشت شده در گلخانه، تحقیق پیش‌رو با هدف ارائه روشی برای شناسایی و تعیین موقعیت سکوه‌های کشت و گلدان-ها و در نتیجه آن تهیه نقشه جامع دو بعدی محیط گلخانه به کمک بینایی استریو اجرا شد.

مواد و روش‌ها

با ترکیب دو تصویر دو بعدی که توسط یک دوربین استریو گرفته می‌شود، ماشین بینایی استریو یک تصویر سه بعدی فراهم می‌کند. در این پژوهش به منظور ساخت دوربین استریو

ملزومات هر سامانه دیداری متحرک به حساب می‌آید و پیش نیاز بسیاری از عملیات‌ها مانند تشخیص، تعیین موقعیت و عبور از موانع، هدایت خودکار و رسیدن به اهداف از پیش تعیین شده و تهیه نقشه محیط کار می‌باشد. برای اجرای این عملیات‌ها نیاز به دانستن موقعیت نسبی فریم کنونی نسبت به فریم پیشین یا فریم مرجع ثابت می‌باشد. به طور معمول این کار توسط حسگرهای کم دقت سرعت چرخ، سامانه موقعیت‌یاب جهانی و یا واحدهای اندازه‌گیری اینرسی^۱ گران قیمت صورت می‌گیرد (Kitt *et al.*, 2010). به عنوان مثال به منظور تهیه نقشه سه بعدی زمین برای کشاورزی دقیق به کمک بینایی استریو، در تحقیقی از یک وسیله نقلیه^۲ و در تحقیق دیگر برای تهیه تصاویر هوایی استریو از بالگرد استفاده شد. در هر دو مطالعه از حسگرهای سامانه موقعیت‌یاب جهانی و ژيروسکوپ به منظور تعیین موقعیت و جهت‌گیری وسیله در هر لحظه نسبت به مرجع جهانی استفاده گردید (Rovira-Más *et al.*, 2005; Rovira-Más *et al.*, 2008).

تخمین میزان جابه‌جایی با استفاده از تغییرات تصاویر گرفته شده از دوربین برای ناوبری ربات‌ها مکان‌یابی دیداری^۳ شناخته می‌شود. در دهه‌های اخیر مکان‌یابی دیداری به عنوان یک راه حل جدید در حل مسئله موقعیت‌یابی ربات در محیط-های ناشناخته معرفی شده است (Milella *et al.*, 2009). در مقابل دیگر حسگرها مکان‌یابی دیداری از مزیت‌های بسیاری برخوردار است، از جمله آن می‌توان به دقت بالای آن در مقایسه با حسگرهای سرعت چرخ اشاره کرد، همچنین روش‌های تخمین موقعیت مبتنی بر سامانه موقعیت‌یاب جهانی یا واحد اندازه‌گیری اینرسی به ترتیب از دقت کم و قیمت بالایی برخوردارند از طرفی نرخ انحراف محلی به‌دست آمده توسط مکان‌یابی دیداری غالباً از نرخ انحراف داده شده توسط واحدهای اندازه‌گیری اینرسی کم‌تر است (Kitt *et al.*, 2010).

کشاورزی رباتیک و کشاورزی دقیق نیازمند داشتن اطلاعات خاصی مانند موقعیت وسیله و توصیف تقریبی از محیط اطراف آن می‌باشند. نقشه ایجاد شده در زمان واقعی می‌تواند این اطلاعات را فراهم کند. به عبارت دیگر برای انجام هر عمل خود مختار توسط وسیله نقلیه خودکار نیاز است که وسیله یک نمایش از محیطی که عمل خودمختار در آن انجام می‌شود، در اختیار داشته باشد. با استفاده از نقشه‌های دو و سه بعدی می‌توان اطلاعاتی مانند شکل و اندازه محصولات، فاصله ردیف‌ها،

1. Inertial Measurement Units (IMU).

2. Gator™ utility vehicle (John Deere, Moline, IL).

3. Visual Odometry.

تحقیق از روش ارائه شده توسط بوگت^۵ برای یکسوسازی تصاویر استفاده شده است. این الگوریتم از پارامترهای انتقال و دوران دو دوربین تنظیم شده برای یکسوسازی استفاده می‌کند (Bradski & Kaehler, 2008).

مرحله بعدی در الگوریتم استریو، انتخاب و استخراج اجزا دو تصویر برای تعیین اجزای متناظر می‌باشد. در پژوهش جاری برای تولید مدل ابر نقطه‌ای از الگوریتم مبتنی بر ناحیه، و برای تعیین موقعیت دوربین نسبت به مبداء جهانی از الگوریتم مبتنی بر ویژگی استفاده شد. مرحله بعدی برای دستیابی به مختصات نقاط محیط و به دست آوردن مدل سه بعدی آن انطباق تصاویر راست و چپ می‌باشد. روش‌های مختلفی برای انجام مرحله انطباق پیشنهاد می‌شود. متناسب با بافت صحنه‌های ثبت شده در محیط گلخانه، در این تحقیق از روش انطباق نیمه عمومی^۶ که در برابر تغییرات نور محیط و لبه‌های اجسام از دقت بالایی برخوردار است، استفاده شده است (Hirschmuller, 2005).

حل مساله تطابق در سامانه تصویربرداری استریوی موازی یک مقدار تمایز d برای هر نقطه (u_L, v_L) در تصویر چپ و متناظر آن (u_R, v_R) در تصویر راست ارائه می‌دهد (شکل ۳). بنابراین با در اختیار داشتن تصویر ناهم‌خوانی (نقشه تمایز) و اطلاعات مربوط به دوربین‌ها و هندسه سامانه تصویربرداری، یعنی وضعیت دوربین‌ها نسبت به هم، به کمک روش مثلث سازی مختصات سه بعدی اجزا با استفاده از روابط ۱ تا ۴ به دست می‌آیند (Cyganek & Siebert, 2009).

$$d = u_L - u_R \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$Z_c = \frac{bf}{d} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$X_c = u_L \frac{Z_c}{f} = u_L \frac{b}{d} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$Y_c = v \frac{Z_c}{f} = v \frac{b}{d} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در روابط فوق d مقدار تمایز، b فاصله دو دوربین (خط مبنا)، f فاصله کانونی دوربین‌ها، (X_c, Y_c, Z_c) مختصات نقطه مورد نظر (طول، ارتفاع و عمق) نسبت به دستگاه مختصات متصل به دوربین سمت چپ و (u, v) مختصات پیکسلی افکنش نقطه مورد نظر در صفحات تصویر می‌باشند. با انتقال تصویر ناهم‌خوانی به فضای سه بعدی مدل ابر نقطه‌ای (نقشه عمق) محیط قابل ترسیم می‌باشد.

موازی، از دو وب‌کم، ساخت شرکت میکروسافت^۱ با رزولوشن ۹۶۰×۵۴۴ که از طریق USB2 به کامپیوتر متصل می‌شوند، استفاده شد (شکل ۱). انتخاب فاصله دو دوربین (خط مبنا) یک فرآیند بهینه سازی بین دقت و انطباق می‌باشد به طوری که خط مبنای کوچک باعث تطبیق آسان‌تر نقاط متناظر در جفت تصویر استریو و مقادیر بزرگ‌تر خط مبنا، سبب افزایش دقت در تخمین عمق می‌شود. بنابراین برای ساخت قاب دوربین استریو به طوری که امکان انتخاب خط مبناهای متفاوت وجود داشته باشد، از یک شمش آلومینیومی به ابعاد $۵ \times ۷ \times ۳۰$ سانتیمتر استفاده شد. در طول شمش، متناسب با ابعاد دوربین، شیارهایی به فاصله مشخص طوری ایجاد شدند که امکان انتخاب خط مبنا با اندازه‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سانتی‌متر فراهم شود (شکل ۲). شیارها می‌باید با فاصله دقیق از هم در طول شمش ایجاد شوند، از طرفی این شیارها باید به گونه‌ای باشند که بعد از قرار گرفتن دوربین‌ها در داخل آن‌ها، تا حد امکان دو دوربین هم صفحه و صفحات تصویر هم ردیف باشند. به همین دلیل بعد از طراحی قاب در نرم‌افزار سالدورکس^۳، به منظور ساخت قاب از دستگاه CNC استفاده شد.

دقت بازیابی سه بعدی در فرآیند بینایی استریو تحت تاثیر پارامترهای متعددی است که عمدتاً در طی فرآیند کالیبراسیون تعیین می‌گردند. در این تحقیق از روش ارائه شده توسط ژنگ^۴ برای کالیبراسیون دوربین‌ها استفاده شد. در این روش اغتشاشات ناشی از نقص لنز دوربین برای مدل دوربین در نظر گرفته می‌شود (Zhang, 1999).

بعد از مراحل ساخت قاب و قرار دادن دوربین‌ها در داخل شیارها بر اساس خط مبنای انتخاب شده و انجام فرآیند کالیبراسیون، به منظور تهیه تصاویر ابتدا قاب دوربین استریو بر روی یک سه پایه دوربین نصب شد. سپس سه پایه در فواصل یکسان به صورت دستی در فضای گلخانه جابه‌جا شده و بعد از هر جابه‌جایی در حالی که سه پایه در موقعیت خود ثابت بود تصاویر تهیه شدند. در ادامه برای بازسازی صحنه از دو تصویر گرفته شده، چهار مرحله طی شد که عبارتند از: یکسوسازی، انتخاب و استخراج اجزای تصویر، تطبیق و یافتن اجزای متناظر در جفت تصویر استریو و بازسازی.

اولین قدم در الگوریتم استریو بعد از تهیه تصاویر اعمال فرآیند یکسوسازی بر جفت تصویر استریو می‌باشد. در این

1. Microsoft LifeCam Studio Webcam.
2. Base line.
3. SolidWorks.
4. Zhang.

5. Bouguet
6. Semi-Global Matching.

تصاویر است (Milella et al., 2009). در این تحقیق برای مکان-یابی دیداری از روش ارائه شده در منبع (Kitt et al., 2010) استفاده شد. در این روش به منظور تخمین موقعیت دوربین، از استخراج و انطباق ویژگی‌های متناظر در تصاویر استفاده می‌شود. با توجه به شرایط محیط گلخانه، ویژگی‌های استخراج شده از تصویر، ویژگی‌های مقاوم پرسرعت^۱ می‌باشند. این ویژگی‌ها مستقل از انتقال، چرخش و مقیاس هستند و تا حد امکان نسبت به تغییرات شدت روشنایی تصویر و نویز مقاوم می‌باشند (Bay et al., 2008). مبتنی بر ویژگی‌های متناظر استخراج شده، میزان جابه‌جایی و دوران دوربین بر پایه هندسه سه گانه میان سه تصویر (تانسور سه دوربینه^۲) تخمین زده می‌شود. در مرحله آخر به کمک فیلتر کالمن نقطه سیگما مکرر^۳ و روش حذف اطلاعات نادرست (رانساک^۴) تخمین میزان جابه‌جایی و دوران فریم به فریم حتی در محیط‌های پویا به خوبی صورت می‌گیرد. مزیت این روش در این است که تخمین میزان جابه‌جایی و دوران دوربین صرفاً بر پایه اطلاعات هندسی دوربین که از کالیبراسیون به دست آمده‌اند، استوار است و بنابراین نیازی به بازآرایی حجم اطلاعات سه بعدی محیط نیست.

بعد از تخمین بردار جابه‌جایی و ماتریس دوران فریم به فریم، موقعیت فریم (دوربین) در لحظه جاری نسبت به مبدا توسط رابطه (۵) تعیین می‌شود (Craig, 2005).

$${}^tframe = {}^{t-1}frame \times {}_t-1frame \quad (\text{رابطه } ۵)$$

$${}_{t-1}frame = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}_{4 \times 4}$$

در تحقیق جاری، نقطه شروع حرکت دوربین سمت چپ به عنوان مبدا مختصات جهانی در نظر گرفته شده است.

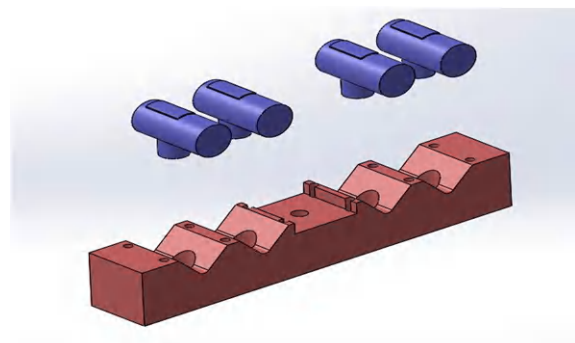
در رابطه (۵)، tframe ، موقعیت دوربین در لحظه جاری نسبت به مبدا جهانی مختصات، T بردار جابه‌جایی و R ماتریس دوران فریم در لحظه t نسبت به فریم در لحظه $t-1$ می‌باشند که از مکان‌یابی دیداری به دست آمده‌اند.

تعیین موقعیت سکوها کشت و گلدان‌ها

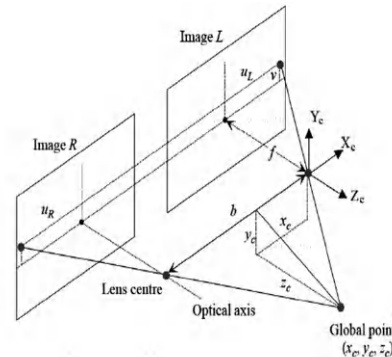
با شناسایی و تعیین موقعیت سکوها کشت و گلدان‌ها به ترتیب به عنوان اصلی‌ترین مانع حرکت و محل قرارگیری گیاه کشت شده، امکان تولید نقشه دو بعدی محیط گلخانه فراهم می‌شود. ساخت مدل کامل سه بعدی از محیط چندان مفید



شکل ۱. وب‌کم استودیو لایف‌کم مورد استفاده در پژوهش



شکل ۲. قالب ساخته شده برای دوربین استریو



شکل ۳. اصول هندسه تصویربرداری استریو دو دوربینه

بازیابی سه بعدی دوربین استریو تا عمق چهار متری از دقت قابل قبولی برخوردار است، در صورتی که برای تولید نقشه جامع از محیط، برای اهدافی همچون طراحی مسیر حرکت به اطلاعات بیش‌تری از محیط نیاز می‌باشد. برای این منظور به تخمین موقعیت دوربین استریو در هر لحظه نیاز می‌باشد تا به کمک آن با کنار هم قرار دادن نقشه‌های محلی، نقشه جامعی از محیط اطراف به دست آید. برای تخمین موقعیت دوربین در هر لحظه از مکان‌یابی دیداری استفاده شده است.

تخمین موقعیت دوربین استریو به کمک مکان‌یابی دیداری

ایده اصلی در روش مکان‌یابی دیداری تخمین میزان حرکت از طریق دنبال کردن ویژگی‌های بصری مشخص در دنباله‌ای از

2. Speeded-Up Robust Features (SURF).
 2. Trifocal tensor.
 3. Iterated Sigma Point Kalman Filter (ISPKF).
 4. Random sample consensus (RANSAC).

با کنار هم گذاشتن نقشه‌های محلی، نقشه جامعی از محیط پیموده شده به دست آورد. بدین ترتیب که بعد از هر دو متر جابه‌جایی یا چرخش نود درجه‌ای دوربین، مدل ابر نقطه‌ای استخراج و با تصویر نقاط سه بعدی مدل بر صفحه XZ ، نقشه‌های محلی به دست می‌آیند. سپس هر نقطه از نقشه محلی به کمک رابطه (۶) به نقطه‌ای در نقشه جهانی انتقال می‌یابد (Craig, 2005).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_o = {}^tframe \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_L \quad Y = 0 \quad (\text{رابطه ۶})$$

در رابطه (۶)، tframe ، موقعیت دوربین در لحظه جاری

نسبت به مبدا جهانی مختصات، $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_L$ ، مختصات نقطه در مدل ابر نقطه‌ای و $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}_o$ مختصات نقطه در مختصات جهانی می‌باشند.

از آنجایی که نقشه‌های محلی و نقشه جهانی به دست آمده در الگوریتم استخراج سکوها و گلدان‌ها به صورت توده‌ای از نقاط دو بعدی می‌باشند و در نتیجه امکان ارزیابی توانایی الگوریتم در تعیین موقعیت وجود ندارد، همچنین انجام عملیاتی مانند سم پاشی مستلزم تعیین دقیق محل قرارگیری گلدان‌ها به صورت تک نقطه دو بعدی می‌باشد. بنابراین نیاز است الگوریتم‌هایی به منظور استخراج و تخمین مختصات گوشه سکوها و محل قرارگیری گلدان‌ها طراحی شود.

به منظور استخراج مختصات گوشه سکوها، بعد از انتقال نقاط نقشه محلی به نقشه جهانی، تمام نقاط سطح بیرونی سکوها، بر حسب مختصات Z ، به ترتیب از کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین مقدار مرتب شدند. در ادامه اختلاف مقادیر Z نقاط متوالی محاسبه و هرگاه مقدار این اختلاف بیش‌تر از یک مقدار آستانه (در این تحقیق ۷۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد) بود، نقطه با مقدار Z کوچک‌تر به عنوان گوشه انتهایی سکو و نقطه با مقدار Z بزرگ‌تر به عنوان گوشه ابتدایی سکوی بعدی انتخاب شد. با هدف تعیین مختصات دو بعدی محل قرارگیری گلدان‌ها، ابتدا تمام نقاط مدل ابر نقطه‌ای که به عنوان گلدان در نظر گرفته شده‌اند به نقشه جهانی منتقل سپس از کوچک‌ترین به بزرگ‌ترین مقدار بر حسب مختصات Z مرتب شدند. در ادامه اختلاف مقادیر Z نقاط متوالی محاسبه و هرگاه این اختلاف بیش‌تر از یک مقدار آستانه بود (در این تحقیق ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد)، نقطه با مقدار Z کوچک‌تر به عنوان نقطه انتهایی گلدان و نقطه با مقدار Z بزرگ‌تر به عنوان نقطه ابتدایی گلدان

نمی‌باشد و سبب افزایش بار محاسباتی می‌شود، چرا که برای تهیه نقشه محیط برای اهدافی مانند مسیریابی صرفاً به اطلاعات X و Z محیط نیاز می‌باشد. از آنجایی که سکوه‌های کشت و گلدان‌ها در ارتفاع مشخصی از سطح زمین قرار دارند، بنابراین در صورتی که ابر نقطه‌ای محیط بر صفحه XZ تصویر شود، نقشه‌ای در اختیار خواهد بود که در آن نقاطی که با ارتفاع مشخصی بالاتر از سطح زمین قرار دارند، از زمین قابل تفکیک خواهند بود.

سطح بیرونی سکوی کشت در محدوده مشخصی از زمین قرار دارد، این محدوده در شکل (۴) با خطوط آبی رنگ مشخص شده است، بنابراین در صورتی که قسمتی از این محدوده استخراج شود، امکان تعیین موقعیت سکوه‌های کشت فراهم می‌شود. به طور مشابه گلدان‌ها که در شکل (۴) با برجسب‌های قرمز رنگ مشخص شده‌اند، در ارتفاع مشخصی بالاتر از سطح زمین قرار دارند، از طرفی گلدان‌ها در پشت لبه سکو به عبارت دیگر پشت سطح بیرونی سکوها قرار گرفته‌اند، بنابراین به کمک این دو قید، امکان تعیین مختصات محل قرارگیری گلدان‌ها نیز فراهم می‌شود.

الگوریتم ارائه شده در این تحقیق با هدف مکان‌یابی سکوه‌های کشت و گلدان‌ها به شرح ذیل می‌باشد: ابتدا نقشه تمایز جفت تصویر استریو در لحظه t به دست می‌آید، سپس با در اختیار داشتن نقشه تمایز و روابط (۱-۴)، مدل ابر نقطه‌ای محیط ساخته و از تصویر مدل ابر نقطه‌ای بر صفحه XZ ، نقشه محلی محیط ایجاد می‌شود. نقاط با ارتفاع بیش‌تر از ۱/۳ متر و کم‌تر از ۱/۴ متر از سطح زمین به عنوان سکوه‌های کشت و نقاط در محدوده ارتفاعی دو تا ۲/۰۳ متر بالاتر از سطح زمین، با قید قرارگیری این نقاط پشت سطح بیرونی سکو، به عنوان گلدان در نظر گرفته شدند. با توجه به دقت دوربین استریو، صرفاً نقاطی که در فاصله چهار متری دوربین هستند، در بازسازی مدل ابر نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۴. نمایشی از سکوه‌های کشت و گلدان‌ها در گلخانه مورد پژوهش حال که موقعیت دوربین در هر لحظه نسبت به مبدا مختصات جهانی با استفاده از رابطه (۵) در اختیار است، می‌توان

نتایج حاصل از فرآیند کالیبراسیون در جدول (۱) ارائه شده است. این نتایج پارامترهای داخلی و خارجی دوربین استریو را دربر می‌گیرد. پارامترهای داخلی شامل فاصله کانونی، نقطه اساسی، اعوجاج‌های شعاعی و مماسی و پارامتر خارجی بردار جابه‌جایی و دوران دوربین سمت راست (دوربین ۲) نسبت به دوربین سمت چپ (دوربین ۱) را نشان می‌دهند.

با توجه به نتایج جدول (۱)، مقدار میانگین خطای پس افکنش^۳ برای دوربین چپ و راست کم‌تر از یک پیکسل، و به ترتیب برابر با ۰/۱۲۱۹ و ۰/۱۲۵۰ پیکسل به دست آمد، که نشان دهنده دقت کافی فرآیند کالیبراسیون در برآورد پارامترهای داخلی دوربین‌ها است. فرآیند طراحی و ساخت قاب دوربین استریو زمانی مطلوب خواهد بود که دوربین‌ها هم صفحه و صفحات تصویر با هم موازی و هم ردیف باشند، از طرفی خط مبنای انتخاب شده برای دوربین استریو ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد، بنابراین انتظار می‌رود که بردار جابه‌جایی در راستای محور X دارای مقدار ۱۰۰ میلی‌متر و در راستای محورهای Y و Z صفر و مقدار زاویه دوران نزدیک صفر باشد. با توجه به جدول (۱)، بردار جابه‌جایی و زاویه دوران دوربین راست نسبت به دوربین چپ به ترتیب (۰/۶۳- و ۰/۸۸ و ۹۹/۷۸-) میلی‌متر و ۰/۱۲۰۳ درجه به دست آمده است، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند ساخت قاب دوربین استریو نیز با دقت کافی انجام شده است.

تعداد تصاویر گرفته شده از محیط گلخانه ۳۴۷ جفت تصویر و مسافت طی شده ۶۲/۲۸ متر می‌باشد. شکل (۶-الف) یک نمونه از جفت تصویر گرفته شده از محیط گلخانه را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از اجرای الگوریتم مکان‌یابی سکوها کشت و گلدان‌ها بر جفت تصویر شکل (۶-الف) در شکل‌های (۶-ب) و (۶-ج) ارائه شده است. شکل (۶-ب) نقشه تمایز و شکل (۶-ج) مدل سه بعدی متناظر با جفت تصویر استریو گرفته شده از دو نمای مختلف را نشان می‌دهند. در نقشه تمایز رنگ هر پیکسل متناظر با فاصله می‌باشد، به عبارت دیگر، پیکسل‌های روشن‌تر اجزایی از محیط را نشان می‌دهند که به دوربین نزدیک‌تر هستند. با توجه به شکل (۶-ب)، از آنجایی که سطح بیرونی سکو دارای پیوستگی در عمق می‌باشد، تغییرات معنی‌داری در شدت پیکسل‌ها وجود ندارد، این در حالی است که لبه‌های سکو دارای عدم پیوستگی در عمق می‌باشند، که این ناپیوستگی در نقشه تمایز، به صورت تغییر معنی‌دار در شدت پیکسل‌ها خود را نشان می‌دهد.

بعدی انتخاب شد، به این ترتیب نقاط ابتدایی و انتهایی هر گلدان مشخص شدند. در انتها نقطه میانگین تمام نقاطی که در بین نقطه ابتدایی و انتهایی هر گلدان قرار دارند محاسبه، و این نقطه به عنوان تک نقطه دو بعدی مشخص کننده محل استقرار گلدان در نظر گرفته شد.

برای ارزیابی دقت الگوریتم استفاده شده در تخمین موقعیت، ابتدا مختصات گوشه سکوها و مختصات محل قرارگیری گلدان‌ها، توسط دوربین مساحی توتال استیشن الکترونیکی لایکا^۱ با دقت دو میلی‌متر نسبت به مبدا مختصات جهانی به دست آمد، سپس به منظور محاسبه خطا در تعیین موقعیت، فاصله اقلیدسی مختصات محل قرارگیری گلدان‌ها و گوشه‌های بدست آمده از طریق دوربین مساحی و مختصات به دست آمده از نقشه‌های محلی محاسبه شد (Civera et al., 2009).

در تحقیق جاری برنامه پیکربندی و جمع‌آوری تصاویر و برنامه تمام الگوریتم‌ها در نرم‌افزار MATLAB 2014b نوشته شد. همچنین برای کالیبراسیون از جعبه ابزار کالیبراسیون دوربین استریو^۲ نرم‌افزار MATLAB 2014b استفاده گردید. همچنین این تحقیق در گلخانه‌ی واقع در پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران واقع در شهر کرج انجام شد. این گلخانه به ابعاد تقریبی ۱۱/۷×۲۳/۰۷ متر و دارای هشت سکوی کشت مستطیل شکل می‌باشد.

نتایج و بحث

انتخاب خط مبنای مناسب یک فرآیند بهینه‌سازی بین دقت و انطباق می‌باشد. همان‌طور که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، در تحقیق حاضر با آزمون و خطا فاصله دو دوربین ۱۰ سانتی‌متر انتخاب شد (شکل ۵).



شکل ۵. دوربین استریو توسعه داده شده

3. Mean reprojection error
4. Mean reprojection error

1. Leica, TC-805.
2. Stereo Camera Calibrator Toolbox.

جدول ۱. تخمین پارامترهای داخلی و خارجی دوربین ها توسط فرایند کالیبراسیون

پارامترهای داخلی		
دوربین اول	دوربین دوم	
[۷۱۸/۶۲۹۵ ± ۵/۵۵۲۲, ۷۱۸/۴۵۴۲ ± ۵/۳۸۱۵]	[۷۱۹/۵۹۹۶ ± ۵/۵۵۵۳, ۷۱۹/۷۶۲۵ ± ۵/۳۹۰۵]	فاصله کانونی (پیکسل)
[۴۷۶/۹۶۸۸ ± ۰/۷۲۴۱, ۲۸۷/۳۱۸۶ ± ۰/۶۸۰۴]	[۴۷۳/۳۴۶۳ ± ۰/۷۳۹۱, ۲۸۸/۰۴۴۷ ± ۰/۷۰۲۴]	نقطه اساسی (پیکسل)
[-۱/۷۵۹۲ ± ۰/۰۵۳۸]	[-۱/۴۹۹۲ ± ۰/۰۵۳۲]	انحراف محورها
[۰/۰۰۹۰ ± ۰/۰۰۱۳, -۰/۰۱۰۳ ± ۰/۰۰۲۵]	[۰/۰۱۶۸ ± ۰/۰۰۱۳, -۰/۰۲۲۹ ± ۰/۰۰۲۳]	اعوجاج شعاعی
[۰/۰۰۲۱ ± ۰/۰۰۰۲, -۰/۰۰۰۶ ± ۰/۰۰۰۲]	[۰/۰۰۱۴ ± ۰/۰۰۰۲, -۰/۰۰۰۶ ± ۰/۰۰۰۲]	اعوجاج مماسی
۰/۱۲۱۹	۰/۱۲۵۰	میانگین خطای پس افکنش
پارامترهای خارجی		
بردار جابه‌جایی و دوران دوربین سمت راست (دوربین ۲) نسبت به دوربین سمت چپ (دوربین ۱)		
[-۰/۶۲۷۷ ± ۰/۱۶۰۵]		بردار جابه‌جایی (mm)
[-۰/۰۰۱۸ ± ۰/۰۰۰۰]		بردار دوران
۰/۱۲۰۳ ± ۰/۰۰۳۴		زاویه دوران (درجه)

دارد، چرا که این الگوریتم قسمتی از سکو را که در محدوده مشخصی از سطح زمین قرار دارد استخراج می‌کند. بنابراین در صورت پوشش بخشی از سکو توسط گیاه این قسمت توسط الگوریتم به عنوان سطح بیرونی سکو در نظر گرفته خواهد شد.

نتایج حاصل از شناسایی و استخراج گوشه سکوه‌های کشت در جداول (۲) و (۳)، و نتایج تشخیص محل استقرار گلدان‌ها به صورت تک نقطه دو بعدی در جدول (۴) ارائه شده است.

همچنین مجموع این نتایج در شکل (۸) نمایش داده شده است.

با توجه به شکل (۸) از مجموع ۳۲ گوشه سکوه‌های کشت، ۲۴ گوشه در مسیر حرکت دوربین استریو قرار داشتند، به دلیل محدودیت در محیط گلخانه، امکان حرکت دوربین در راهروهای ابتدایی و انتهایی فراهم نبود، به همین دلیل هشت گوشه با شماره برچسب، ۱، ۳، ۵، ۷، ۲۶، ۲۸، ۳۰ و ۳۲ در مسیر حرکت دوربین استریو قرار نگرفته و در نتیجه امکان تخمین موقعیت آن‌ها توسط الگوریتم فراهم نشد. از تعداد ۲۴ گوشه، ۲۰ گوشه، به عبارت دیگر ۸۳/۳۳ درصد از گوشه سکوه‌های کشت، با میانگین خطای ۰/۰۹ متر، انحراف معیار ۰/۰۳۳۴ متر و میانگین مربع خطای ۰/۰۰۹ متر تشخیص داده شدند. با توجه به شاخص‌های آماری ذکر شده، می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم ارائه شده دارای دقت مطلوبی در تخمین موقعیت گوشه‌ها می‌باشد. بیش‌ترین خطا در تخمین موقعیت گوشه‌ها، بر اساس فاصله اقلیدسی، مربوطه به گوشه سکو با برچسب شماره ۳۱ و به مقدار ۰/۱۵ متر و کم‌ترین مقدار خطا با مقدار ۰/۰۲ متر و مربوطه به گوشه سکو با برچسب شماره ۱۷ می‌باشد.

ناپیوستگی عمق به عنوان نقطه‌ای در صفحه تصویر تعریف می‌شود که در عمق میدان^۱ متناظر با آن نقطه یک ناپیوستگی وجود دارد. به عبارت دیگر زمانی که پرتو نوری مرتبط با یک نقطه در صفحه تصویر در جهان سه بعدی با یک شی برخورد کند ناپیوستگی عمق در این نقطه به وجود می‌آید. این ناپیوستگی مشابه لبه در تصاویر دو بعدی می‌باشد. ناپیوستگی عمق امکان تشخیص شی از پس زمینه و اشیاء دیگر را فراهم می‌کند. همچنین از شکل (۶-ج) نتیجه گرفته می‌شود که الگوریتم ارائه شده توانایی تفکیک گلدان‌ها از یکدیگر و همچنین تشخیص سکوه‌های کشت، با دقت مطلوب را دارا می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۶-ج) نشان داده شده است، در بازسازی مدل ابر نقطه‌ای و متناسب با دقت دوربین استریو صرفاً از نقاطی که در فاصله چهار متری دوربین قرار دارند، استفاده شد.

نقشه دو بعدی محیط گلخانه در صفحه XZ در شکل (۷)

ارائه شده است. در این شکل محل قرارگیری گلدان‌ها و سکوه‌های کشت، به صورت توده‌ای از نقاط دوبعدی به ترتیب با رنگ‌های سبز و قرمز مشخص شده‌اند. مجموع طول سکوی‌های کشت ۱۰۶/۶ متر می‌باشد. از این مجموع، ۱۰۰/۲۶ متر یعنی ۹۴/۰۵ درصد از طول کل سکوها، توسط الگوریتم ارائه شده، مورد شناسایی قرار گرفت. در شکل (۷) قسمت‌های شناسایی نشده از سکوها با رنگ آبی مشخص شده‌اند، این قسمت‌ها به دلیل قرار نگرفتن در زاویه دید دوربین استریو شناسایی نشدند. در صورتی که قسمت‌هایی از سطح بیرونی سکوها توسط گیاه پوشیده شود باز هم امکان استفاده از الگوریتم ارائه شده وجود

2 . Mean squared error (MSE).

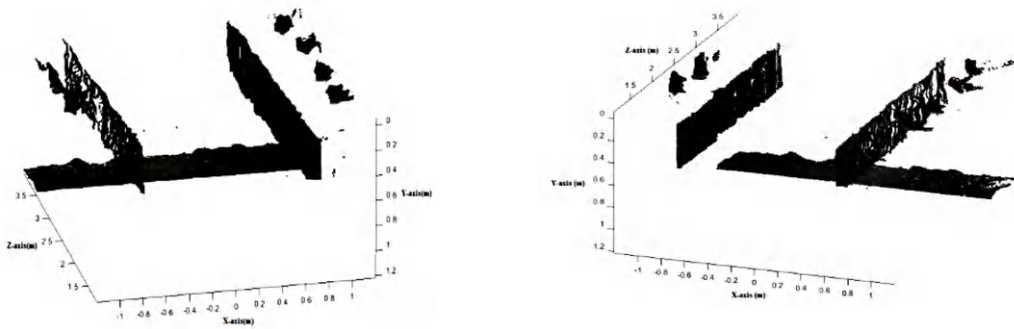
1 .Depth of field.



(الف)

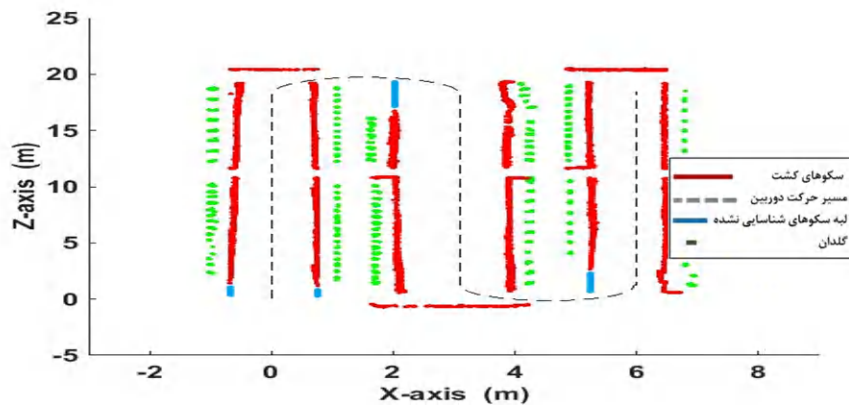


(ب)



(ج)

شکل ۶. الف) نمونه ای از جفت تصویر گرفته شده از گلخانه توسط دوربین استریو (ب) نقشه تمایز جفت تصویر شکل الف و ج) نمایش بازسازی مدل ابر نقطه‌ای مربوط به شکل الف از دو نمای راست و چپ.



شکل ۷. نقشه دو بعدی محیط گلخانه در صفحه XZ

در شکل (۸)، عدم شناسایی گوشه‌ها با برچسب ۲، ۱۰، ۱۵ و ۱۸ به دلیل قرار نگرفتن این گوشه‌ها در زاویه دید دوربین می‌باشد، در نتیجه شناسایی نشدن چهار گوشه ذکر شده، قسمت‌هایی از سکوهای کشت که در شکل (۸) به صورت ناحیه‌های هاشور خورده نشان داده شده‌اند، شناسایی و تشخیص داده نشدند.

در شکل (۸)، عدم شناسایی گوشه‌ها با برچسب ۲، ۱۰، ۱۵ و ۱۸ به دلیل قرار نگرفتن این گوشه‌ها در زاویه دید دوربین می‌باشد، در نتیجه شناسایی نشدن چهار گوشه ذکر شده،

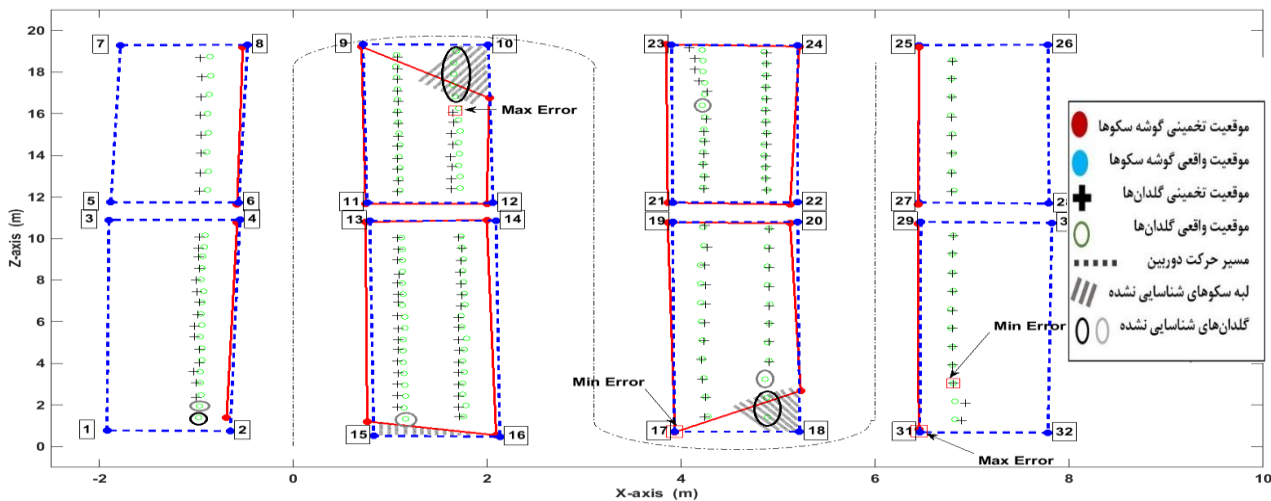
نشدن اجزاء در تصویر دوم به دلیل قرار گرفتن در حاشیه سمت چپ یا راست تصویر و یا به دلیل انسداد ایجاد می‌شود.

نتیجه گیری

اصلی‌ترین مانع حرکت در محیط گلخانه سکوها کشت می‌باشند، از طرفی تعیین موقعیت محصول اطلاعات مفیدی را برای انجام عملیاتی همچون آبیاری و سم‌پاشی، ارائه می‌دهد. بنابراین با شناسایی و تعیین موقعیت سکوها کشت و گلدان‌ها به عنوان محل استقرار محصول، امکان ساخت نقشه جامع دو بعدی محیط گلخانه فراهم می‌شود.

روش ارائه شده در این تحقیق برای شناسایی و تعیین موقعیت سکوها و گلدان‌ها، بر مبنای استفاده از مختصات سه بعدی اجزاء محیط، که از سامانه بینایی استریو به دست می‌آیند، استوار است.

با توجه به جدول (۴) و شکل (۸)، از مجموع ۱۵۲ گلدان، ۱۴۰ گلدان یعنی ۹۲/۱۰ درصد از گلدان‌ها، با میانگین خطای ۰/۰۷ متر، انحراف معیار ۰/۰۴۰۷ متر و میانگین مربع خطای ۰/۰۰۶ متر شناسایی شدند. شاخص‌های آماری، حاکی از دقت مطلوب الگوریتم در تخمین موقعیت گلدان‌ها است. بیش‌ترین مقدار خطا در تخمین موقعیت گلدان‌ها، بر اساس فاصله اقلیدسی، ۰/۲ متر و کم‌ترین مقدار خطا ۰/۰۰۵ متر می‌باشد. در شکل (۸) گلدان‌های شناسایی نشده (۱۲ گلدان) با برجسب‌های مشکی و خاکستری رنگ مشخص شده‌اند. عدم شناسایی هشت گلدانی که دارای برجسب مشکی رنگ هستند، به دلیل قرار نگرفتن این گلدان‌ها در زاویه دید دوربین می‌باشد. چهار گلدان دیگر که علی‌رغم قرارگیری در زاویه دید دوربین مورد شناسایی قرار نگرفته‌اند، با برجسب خاکستری رنگ مشخص شده‌اند. علت عدم شناسایی این گلدان‌ها، به دلیل تطابق نامناسب می‌باشد. مشکلات تطابق بر اثر تغییرات روشنایی یا نویز تصویر، دیده



شکل ۸. نقشه گوشه سکوها کشت و گلدان‌ها در صفحه XZ

جدول ۳. مقادیر خطا در تخمین موقعیت گوشه سکوها

MSE(m)	خطای کمینه			
	خطای بیشینه (m)	میانگین خطا (m)	انحراف معیار استاندارد (m)	انحراف معیار استاندارد (m)
۰/۰۰۸۹	۰/۱۴۶۰۶	۰/۰۸۹۰۹	۰/۰۳۳۴۴	۰/۰۰۸۹

جدول ۲. نتایج حاصل از شناسایی موقعیت گوشه سکوها

تعداد گوشه سکوها	تعداد گوشه‌های شناسایی شده		
	شماره برجسب شماره	شماره برجسب شماره	تعداد گوشه‌های شناسایی شده
۲۴	۳۱	۱۷	۲۰ (۸۳/۳۳)

جدول ۴. نتایج حاصل از شناسایی و تخمین موقعیت گلدان‌ها

MSE(m)	خطای کمینه				تعداد گلدان‌های شناسایی شده	تعداد گلدان‌ها
	خطای بیشینه (m)	میانگین خطا (m)	انحراف معیار استاندارد (m)	خطای بیشینه (m)		
۰/۰۰۶۵	۰/۲۰۴۷	۰/۰۶۹۷	۰/۰۴۰۷	۰/۰۰۴۶	۱۴۰ (۹۲/۱۰۵)	۱۵۲

زمین قرار دارند، از یکدیگر قابل تفکیک خواهند بود. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که الگوریتم معرفی شده، از مجموع طول سطح بیرونی سکوها، توانایی شناسایی ۱۰۰/۲۶ متر، یعنی ۹۴/۰۵ درصد از طول کل سکوها را دارد.

از آنجایی که سکوها کشت و گلدان‌ها در ارتفاع مشخصی از سطح زمین قرار دارند، بنابراین در صورتی که ابر نقطه‌ای محیط بر صفحه XZ تصویر شود، نقشه‌ای در اختیار خواهد بود که در آن نقاطی که با ارتفاع مشخصی بالاتر از سطح

معرفی شده توانایی تشخیص و تعیین موقعیت ۹۲/۱۰ درصد از گلدان‌ها با میانگین خطای ۰/۰۷ متر و میانگین مربع خطای ۰/۰۰۶ متر را دارا می‌باشد. بیش‌ترین مقدار خطا در تخمین موقعیت گلدان‌ها، بر اساس فاصله اقلیدسی، ۰/۲ متر و کم‌ترین مقدار خطا ۰/۰۰۵ متر حاصل شد.

همچنین ۸۳/۳۳ درصد از گوشه‌های سکوه‌های کشت با میانگین خطای ۰/۰۹ متر و میانگین مربع خطای ۰/۰۰۹ متر توسط الگوریتم ارائه شده، شناسایی شدند. بیش‌ترین خطا در تخمین موقعیت گوشه‌ها، بر اساس فاصله اقلیدسی، به مقدار ۰/۱۵ متر و کم‌ترین مقدار خطا با مقدار ۰/۰۲ متر به دست آمد. همچنین از نقشه دو بعدی محیط گلخانه نتیجه گرفته شد که الگوریتم

معرفی نمادها

b	خط مبنا (mm)
d	مقدار تمایز
f	فاصله کانونی دوربین
t_{frame}	ماتریس ۴×۴، توصیف موقعیت دوربین نسبت به مبدا مختصات
$t_{-1frame}$	ماتریس ۴×۴، توصیف موقعیت دوربین در لحظه t نسبت به $t-1$
MSE	میانگین مربع خطای داده‌ها
R	ماتریس دوران
T	بردار جابه‌جایی (m)
u, v	مختصات پیکسلی در صفحه تصویر
X_c, Y_c, Z_c	مختصات نقطه نسبت به دستگاه مختصات متصل به دوربین سمت چپ (m)
X_o, Y_o, Z_o	مختصات نقطه در مدل ابر نقطه‌ای (m)
X_L, Y_L, Z_L	مختصات نقطه در چهارچوب مختصات جهانی (m)

REFERENCES

- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T. & Van Gool, L. (2008). Speeded-up robust features (SURF). *Computer vision and image understanding*, 110, 346-359.
- Benson, E., Reid, J. & Zhang, Q. (2003). Machine vision-based guidance system for an agricultural small-grain harvester. *Transactions of the ASAE*, 46, 1255-1264.
- Bhatti, A. (2011) *Advances in theory and applications of stereo vision*. Croatia: InTech.
- Bradski, G. & Kaehler, A. (2008) *Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library* (First ed.). Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc.
- Brosnan, T. & Sun, D.-W. (2002). Inspection and grading of agricultural and food products by computer vision systems—a review. *Computers and electronics in agriculture*, 36, 193-213.
- Cantón, J., Donaire, J. & Sánchez-Hermosilla, J. (2012). Stereovision based software to estimate crop parameters in greenhouses. In: *Proceeding of Information Technology, Automation and Precision Farming. International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng: Agriculture and Engineering for a Healthier Life*. 8-12 July., Valencia, Spain, pp. P-0852.
- Civera, J., Grasa, O. G., Davison, A. J. & Montiel, J. (2009). 1-point RANSAC for EKF-based structure from motion. In: *Proceeding of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 11-15 October., Louis, USA, pp. 3498-3504.
- Craig, J. J. (2005). *Introduction to robotics: mechanics and control*. Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, USA.
- Cyganek, B. & Siebert, J. P. (2009) *An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms* (First ed.). United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd.
- Hirschmuller, H. (2005). Accurate and efficient stereo processing by semi-global matching and mutual information. In: *Proceeding of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*. 20-26 June. ,San Diego, CA, USA, pp. 807-814.
- Kise, M. & Zhang, Q. (2008). Development of a stereovision sensing system for 3D crop row structure mapping and tractor guidance. *Biosystems Engineering*, 101, 191-198.
- Kise, M., Zhang, Q. & Más, F. R. (2005). A stereovision-based crop row detection method for tractor-automated guidance. *Biosystems Engineering*, 90, 357-367.
- Kitt, B., Geiger, A. & Lategahn, H. (2010). Visual odometry based on stereo image sequences with RANSAC-based outlier rejection scheme. In: *Proceeding of Intelligent Vehicles Symposium*. 21-24 June., University of California, San Diego, CA, USA, pp. 486-492.
- McCarthy, C. L., Hancock, N. H. & Raine, S. R. (2010). Applied machine vision of plants: a review with implications for field deployment in automated farming operations. *Intelligent Service Robotics*, 3, 209-217.

- Milella, A., Nardelli, B., Di Paola, D. & Cicirelli, G. (2009). Robust Feature Detection and Matching for Vehicle Localization in Uncharted Environments. In: *Proceeding of the IEEE/RSJ IROS Workshop Planning, Perception and Navigation for Intelligent Vehicles*. 30 June., Saint Louis, USA, pp. 11-16.
- Rosell, J. & Sanz, R. (2012). A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 124-141.
- Rovira-Más, F., Zhang, Q. & Reid, J. (2005). Creation of three-dimensional crop maps based on aerial stereoisimages. *Biosystems Engineering*, 90, 251-259.
- Rovira-Más, F., Zhang, Q. & Reid, J. F. (2008). Stereo vision three-dimensional terrain maps for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 60, 133-143.
- Slaughter, D., Giles, D. & Downey, D. (2008). Autonomous robotic weed control systems: A review. *Computers and electronics in agriculture*, 61, 63-78.
- Torii, T. (2000). Research in autonomous agriculture vehicles in Japan. *Computers and electronics in agriculture*, 25, 133-153.
- Trucco, E., and A. Verri. 1998. *Introductory techniques for 3-D computer vision*. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Xia, C., Li, Y., Chon, T.-S. & Lee, J.-M. (2009). A stereo vision based method for autonomous spray of pesticides to plant leaves. In: *Proceeding of Industrial Electronics, ISIE. IEEE International Symposium on*. 5-8 July., Seoul Olympic Parktel, Seoul, Korea, pp. 909-914.
- Yeh, Y.-H. F., Lai, T.-C., Liu, T.-Y., Liu, C.-C., Chung, W.-C. & Lin, T.-T. (2014). An automated growth measurement system for leafy vegetables. *Biosystems Engineering*, 117, 43-50.
- Zhang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In: *Proceeding of Computer Vision, The Seventh IEEE International Conference on*. 20-27 Sept., Kerkyra, Greece, pp. 666-673.