کاربردهای سیستم‌های تصویربرداری سه‌بعدی در اتوماسیون و رباتیک کشاورزی

جعفر امیری‌پریان[۱]، طیبه نیری‌فرد[۲]

[۱]استادیار، دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم؛ amiriparian@basu.ac.ir

[۲]دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه بوعلی‌سینا، دانشکده کشاورزی، گروه مهندسی بیوسیستم؛ nayerifard@engineer.com

چکیده

در تصویربرداری سه‌بعدی هدف اصلی، ایجاد یک مجموعه ابرنقاط از نمونه‌های هندسی از سطح یک موضوع و شبیه‌سازی مجازی اشیاء است. داده های سه بعدی جمع آوری شده برای طیف گسترده ای از برنامه های کاربردی مفید است. افزایش کارآمدی و بازده منابع در اتوماسیون کشاورزی به اطلاعات بیشتری در مورد مراحل تولید و شرایط ماشین‌آلات نیازمند است. در این میان وجود سنسورها برای بررسی شرایط تولید و وضعیت ساختارهای محیطی مانند اجسام، علامت‌های طبیعی یا مصنوعی و موانع لازم هستند. در حال حاضر سنسورهای سه‌بعدی، از لحاظ اقتصادی به صرفه و از لحاظ تکنولوژی بسیار پیشرفته هستند. هدف از این مقاله بررسی سیستم‌های پیشرفته سه‌بعدی در صنعت کشاورزی است. ساختار این تحقیق شامل یک مرور کلی از روش‌های دید سه‌بعدی دیجیتال بر اساس اصول اساسی است. سپس کاربرد آن‌ها در کشاورزی بررسی می‌شود. تمرکز اصلی بر روی سه موضع اصلی، ناوبری، کشاورزی و دامپروری است.

کلمات کلیدی: سنسورهای ۳ بعدی، اتوماسیون کشاورزی، مثلث‌سازی نوری، زمان پرواز، تداخل سنجی، رباتیک کشاورزی

Applications of 3D imaging systems in automation and agricultural robotics

Jafar Amiri Parian[1], Tayebeh Nayerifard[2]

[1]Faculty Member at Bu-Ali Sina University, amiriparian@basu.ac.ir

[2]MS. in Mechanical Engineering of Biosystem, nayerifard@engineer.com

ABSTRACT

The main aim in the three-dimensional imaging is creating a set of cloud points from geometric samples of a subject's surface and making a virtual simulation of objects. Efficiency increase of resources through automation of agriculture requires more information about the production process. Sensors are necessary for monitoring the status and condition of production by recognizing the surrounding structures such as objects, field structures, natural or artificial markers, and obstacles. Currently, three-dimensional (3-D) sensors are economically affordable and technologically advanced largely. The aim of this review paper is to investigate the state-of-the-art of 3-D vision systems in agriculture. The structure of this research consists of an overview of the different optical 3-D vision techniques, based on the basic principles. Afterwards, their application in agriculture reviewed. The focus lays on vehicle navigation, and crop and animal husbandry.

Keywords: 3-D sensors, agricultural automation, optical triangulation, time of flight, interferometry, agricultural robotics

۱- مقدمه

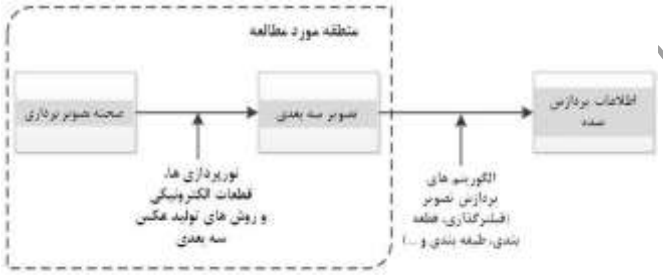
با افزایش روزافزون جمعیت، به استراتژی‌های جدی و پایداری در بخش عرضه و تقاضا محصولات کشاورزی جهت افزایش بهره‌وری از منابع محدود مورد نیاز است. مکانیزاسیون و تقویت صنعت کشاورزی به ایجاد یک سیستم پایدار و متوازن در تولید مواد غذایی کمک می‌کند تا بتواند غذا، خوراک، فیبر و حتی سوخت را برای مردم جهان تامین کند. متاسفانه، حجم بسیار زیادی از نهاده‌هایی مانند سوخت، آب، علف‌کش‌ها، آفت-کش‌ها و کودها در این بخش مورد استفاده قرار گرفته است و از طرفی دیگر بهره‌وری پایین از این منابع، شرایط ناپایداری در محیط‌زیست ایجاد کرده است .برای اینکه یک جامعه بتواند محصولات مورد نیاز آینده خود را تامین نماید، می‌تواند به دو تکنولوژی مهم اتوماسیون صنعتی و رباتیک تکیه کند. این تکنولوژی‌ها هزینه‌های تولید و کار طاقت‌فرسای کارگران را کاهش و کیفیت محصولات مزرعه را افزایش داده‌اند و از طرفی کنترل محیطی را بهبود بخشیده‌اند(Edan Y et al., 2004). سیستم های بینایی یک‌بعدی و دوبعدی، بخش جدایی‌ناپذیری از اجرای موفقیت‌آمیز

۱- جعفر امیری پریان، دانشگاه بوعلی‌سینا، گروه مهندسی بیوسیستم، ۳۴۴۲۴۱۹۰ (۸۱) ۹۸+

اتوماسیون کشاورزی و رباتیک‌ها در زنجیره تولید غذا بوده‌اند. امروزه اعتقاد بر این است که فناوری ماشین بینایی در یک نقطه عطف قرار دارد و به کمک تکنولوژی‌های پیشرفته و قیمت‌های پایین دستگاه‌ها در بازار مصرف کنندگان، رویکردی به سمت سه‌بعدی سازی دارد (Eddershaw,2014).

در دهه گذشته تعداد نشریات مربوط به ماشین بینایی سه‌بعدی در بخش کشاورزی رشد سریعی داشته است. برخی از دلایل مشارکت در این گرایش عبارتند از افزایش مستمر در قدرت پردازش کامپیوتر، کاهش هزینه و اندازه قطعات الکترونیک، افزایش کارایی نورپردازی در شرایط ثابت، ویژگی منحصر به فرد غیرتماسی و غیرمخرب بودن تکنولوژی ماشین بینایی و نیاز به دانش بیشتر و مراقبت از محصولات خاص.

در سیستم‌های بینایی سه‌بعدی، یک تصویر به تنهایی حاوی مقادیر زیادی از اطلاعات است که در آن حصول به اطلاعات عمق پیچیده است. با افزایش یک بُعد، در یک تصویر سه‌بعدی مقدار داده‌ای که نیاز به پردازش دارد افزایش یافته که این موضوع اهمیت روش‌های تولید تصویر سه‌بعدی را نشان می‌دهد. این روش‌ها برای استخراج اطلاعات عمق حیاتی هستند (Bellmann, 2007). شکل ۱ تمایز میان تولید تصویر سه‌بعدی و روش-های پردازش تصویر را نمایش می‌دهد. روش های تولید تصاویر سه‌بعدی برای تولید داده‌های خام سه‌بعدی مفید، حیاتی و لازم هستند. هدف از این مقاله بررسی وضعیت پیشرفت سیستم‌های دید سه‌بعدی در کشاورزی و نقش، ارزش و مزایایی است که فقط داده‌های حاصل از این تصاویر می‌توانند ارائه دهند.



شکل ۱- تمایز میان تولید تصویر سه‌بعدی و روش‌های پردازش تصویر

۲- روش‌های سه‌بعدی سازی

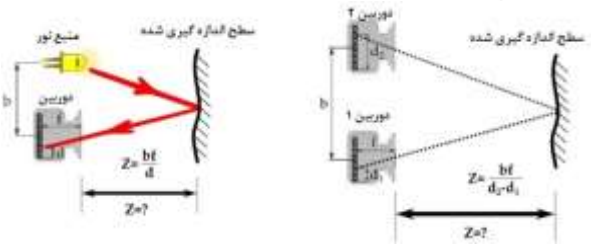
یک تصویر سه‌بعدی مجموعه‌ای عظیم از اندازه‌گیری‌های فواصل از نقاط سطوح مورد نظر تا مبدا در یک سیستم مختصات مرجع شناخته شده است. همچنین بسته به مفاد و محتوای عکس، یک تصویر سه‌بعدی می‌تواند به عنوان تصویر یک محدوده، نقشه عمق یا تصویر ۲/۵ بعدی شناخته شود. در نقشه‌برداری، اصطلاحاتی مانند نقشه دیجیتالی زمین (DTM)[2]، مدل‌دیجیتالی ارتفاع (DEM)[3] و مدل سطح دیجیتال (DSM)[4] معمولا مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین چندین نوع از امواج طیفی مانند نور، اولتراسوند و مایکروویو می‌توانند برای بازیابی اطلاعات عمق مورد استفاده قرار گیرند. بدست آوردن داده‌های سه‌بعدی با روش‌های نوری در مقایسه با سایر روش‌ها ارجحیت دارد، زیرا سیستم‌های نوری[5] اجازه دستیابی سریع به شکل و ظاهر سه‌بعدی اجسام، رزولوشن بالا و مطابقت با استانداردهای ایمنی را می‌دهند. چندین طبقه‌بندی براساس خصوصیات رایج پیشنهاد شده است، اما یکی از این طبقه‌بندی‌ها که بر مبنای اصول اساسی توسط اسکورات و همکاران است تبیین شده(Schwarte et al., 1999)، به طور گسترده مورد پذیرش قرار گرفته است. این اصول و روش‌های اساسی برای اندازه‌گیری عمق عبارتند از مثلث‌سازی(Triangulation) ، زمان پرواز (TOF)[6] و تداخل‌سنجی(Interferometry).

۲-۱- مثلث‌سازی

در این روش با استفاده از قوانین هندسه و زاویه پرتو ارسالی و دریافتی میزان فاصله تا هدف تخمین زده می‌شود. با زیادترشدن فاصله اندازه گیری دقت این روش به میزان شدیدی افت پیدا می‌کند. در صنعت نیز از میان تمامی روش‌های موجود، به دلیل تکنولوژی ساده‌تر، مقاومت، دقت بالا و همچنین قیمت ارزان، این روش مورد توجه سازندگان قرار گرفته است (نیری‌فرد، ۱۳۹۴). روش مثلث‌سازی اغلب روش مورد استفاده برای اندازه‌گیری عمق است. شکل ۲، دو مثال متداول از روش‌های مثلث‌سازی را با استفاده از نورپردازی فعال و غیرفعال نمایش داده شده است. روش مثلث‌سازی به روش‌های مختلفی برمبنای نشانه‌های بصری به منظور استخراج عمق تقسیم می‌شود. که شامل روش‌های اندازه‌گیری فتوگرامتری دیجیتال(غیرفعال)، نورپردازی ساختاریافته(فعال)، سایه اندازی، متمرکزسازی و تئودولیت است.

---

[2]Digital Terrain Map
[3]Digital Elevation Model
[4]Digital Surface Model
[5]Optical
[6]Time Of Flight



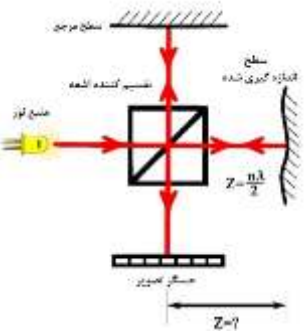
شکل۲- روش مثلث‌سازی پرتو نور (چپ) و استریو (راست). Z عمق؛ b طول پایه؛ d موقعیت پرتو نور ورودی در سنسور و f فاصله کانونی

۲-۲- زمان پرواز

سنسورهای TOF با استفاده از سرعت نور و زمان پرواز عمق را به طور مستقیم یا غیرمستقیم اندازه‌گیری می‌کنند. سنسورهایی مانند LIDARs، Flash LIDARs و دوربین‌های TOF متعلق به این دسته هستند. اصول اندازه‌گیری عمق TOF را می‌توان به مدولاسیون پالس[7]، مدولاسیون موج ادامه‌دار[8] و مدولاسیون شبه نویز[9] تقسیم کرد. دوربین‌های TOF از دهه گذشته در دسترس بوده و به طور فزاینده‌ای در برنامه-های کشاورزی کاربرد دارند. این دوربین‌ها برای رزولوشن و پیکسل پایین و هزینه‌ی بالا شناخته شده‌اند.

۲-۳- تداخل‌سنجی

تداخل‌سنجی با داشتن دقتی در محدوده نانومتر از دقیق‌ترین روش‌ها محسوب می‌شود. عملکرد اصلی تداخل‌سنجی برمبنای تقسیم یک پرتو نوری منسجم به دو پرتو است، که یکی از آنها به سمت یک آینه مرجع تابیده می‌شود، در حالی که اشعه دیگر به سمت نمونه حرکت می‌کند. سپس هر دو پرتو به شکاف دهنده پرتو بازتاب و به سوی یک سنسور تابانده می‌شوند، جایی که اختلاف فاز میان پرتوها برای تعیین عمق نسبی استفاده می‌شود (شکل ۳). توموگرافی تداخل نوری[10] (OCT) یک روش تداخل‌سنجی است که بسته به عمق نفوذ نور قادر به تولید تصویر توموگرافی کامل یا توپوگرافی است. دیگر روش‌های تداخل‌سنجی به چند طول موجی، هولوگرافی، پرتوهای بینابینی و نور سفید طبقه‌بندی می-شوند.



شکل ۳- اصل اساسی اندازه‌گیری زمان پرواز. فاصله Z به زمان t بستگی دارد که پالس نور را برای حرکت به عقب و جلو حرکت می‌دهد.

۳- کاربردها در کشاورزی

۳-۱ – ناوبری وسایل نقلیه

بخش کشاورزی با استفاده از سیستم ماهواره‌ای ناوبری جهانی (GNSS[11]) پیشگام در ناوبری خودگردان است. سیستم تعیین موقعیت ماهواره‌ای با استفاده از امواج دریافتی از سمت ماهواره‌های موجود در مدار و به کمک گیرنده‌های زمینی امکان تعیین محل قرار گرفتن یک نقطه در فضای سه‌بعدی را فراهم می‌آورد. ناوبری خودگردان در کشاورزی بر اساس گیرنده‌های خاص خود می‌تواند اطلاعات دقیقی از موانع و ساختارهای اطراف یک ماشین مانند اشیاء، موانع، ساختارهای زمین، نشانگرهای طبیعی و یا مصنوعی در دسترس قرار دهد. اگر جنبه‌های ایمنی

[7] Pulse Modulation
[8] Continuous Wave Modulation
[9] Pseudo-Noise Modulation
[10] Consumer TOF Camera
[11] *Global Navigation Satellite System*

سیستم‌های خودکار و روباتیک به خوبی رعایت شود، می‌توانند مورد پذیرش کشاورزان قرار بگیرند(Griepentrog et al., 2009). با این حال چندین بررسی در مورد ناوبری خودگردان وسایل نقلیه کشاورزی نوشته شده است، اما تمرکز و تحقیقات کمی بر رویکرد بینایی سه‌بعدی وجود دارد.

۳ -۱ -۱ – مثلث سازی

در تحقیقات مختلف استفاده از علائم در دید استریو برای ناوبری خودگردان با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. به‌عنوان مثال در ردیف-های محصول، می‌توان از لبه‌های با برش و بدون برش، مرزها، حفره‌ها، نشانگرهای مصنوعی، چرخدنده‌ها و حتی خاک استفاده نمود. کایس و همکاران (Kise et al. 2005)یک سیستم دید استریو ایجاد کردند که از ساختار سه‌بعدی ردیف کاشت برای هدایت خودکار استفاده می‌کرد؛ مشکلاتی مانند بار محاسباتی بالا و پیکسل‌های خالی برخی از نقاط (به ویژه آنهایی که دورتر هستند) گزارش شد، اما با استفاده از یک قاعده کاهش رزولوشن و فیلترینگ این روش مورد توجه قرار گرفت. رویراماس و همکاران (Rovira-Más et al., 2007) از لبه‌های برش نشده زمین مزرعه به عنوان مرجع برای راهنمایی خودگردان استفاده کردند. آن‌ها گزارش دادند که آسمان ابری تولید نقاط سه‌بعدی را تحت تاثیر قرار داده و برگ‌های بلند ذرت نیز دوربین را مسدود کردند و لذا موقعیت قرارگیری دوربین مورد اهمیت قرار گرفت. آنها هم‌چنین با مشکلات مربوط به پردازش محاسبات مواجه شدند، اما با کاهش میزان نقاط به یک محدوده مشخص، آن‌را حل کردند. هاناوا و همکاران (Hanawa et al., 2012) با استفاده از شیارها، حفره‌ها و نشانگرهای مصنوعی برای راهنمایی خودگردان بر انعطاف‌پذیری سیستم خود تمرکز کردند. آن‌ها عوامل محدودکننده را زمانی که نور خورشید بسیار قوی بود و سایه تراکتور در محدوده سیستم تصویربرداری سه‌بعدی قرار می‌گرفت، بیان کردند. بلاس و همکاران (Blas et al., 2011) یک سیستم راهنمایی خودگردان ارائه کردند که از یک ردیف باریک به عنوان مرجع اصلی استفاده می‌کرد. این سیستم تصویربرداری سه‌بعدی با تفکیک‌پذیری ارتفاع مشکل داشت و قادر به تشخیص تفاوت در یک منطقه بسیار صاف از ردیف‌ها نبود. وانگ و همکاران (Wang et al., 2011) بر دید استریو برای ردیابی سطوح پرتراکم بافت از یک میدان کشت شده و محاسبه افست جانبی وسیله نقلیه تکیه کردند. هنگامی که وسیله نقلیه در مسیر مستقیم حرکت کرد، حداکثر انحراف مطلق ۵۰ میلیمتر اندازه‌گیری شد و اگر چه در مسیرهای منحنی خوب عمل نکرده بود، هیچ محدودیت فنی در مورد سیستم اکتسابی استریو گزارش نشد. رینا و میللا (Reina et al. 2012) با استفاده از روش مثلث-سازی و آموزش ماشین با نشانه‌گذاری‌های زمینی یا غیرزمینی در محیط کشاورزی، ۹۱٪ دقت در طبقه‌بندی را گزارش کردند. علاوه بر این، آنها دید استریو را با سایر روش‌های تصویربرداری ترکیب کردند که در نتیجه مشخص شد ترکیب LIDAR و دید استریو در بسیاری از جنبه‌ها مکمل هستند. در مجموع نتایج طبقه‌بندی با سنسورهای ترکیبی بهتر از سنسورهای تک بود. با استفاده از سنسورهای سه‌بعدی نتایج عملکردهایی مانند تشخیص موانع سخت و محکم و یا تغییر فرم داده، قابلیت اطمینان و حفاظت از اپراتور، همگی شایان و قابل‌توجه است. یانگ و نگوچی (Yang et al., 2012) از دو دوربین چند منظوره برای ایجاد یک سیستم ایمنی تشخیص انسان استفاده کردند که قادر به گرفتن یک تصویر عمقی با خطای گزارش شده کمتر از ۰/۵ متر بود، اما آزمایش در زمان روز بیش از یک انسان تنها را تشخیص نمی‌دهد. نیسیموف و همکاران (Nissimov et al., 2015) یک سیستم تشخیص موانع برای محیط گلخانه با استفاده از CTS را توسعه دادند که تنها چند شناسایی اشتباه مثبت در برداشت داشت. آن‌ها ادعا می‌کنند که این سیستم می‌تواند در یک کامپیوتر با قابلیت پردازش محدود استفاده شود. البته چندین منبع خطا مثل مشکلات با سطوح صاف و براق، نامیزانی بین RGB و عمق تصویر، تاخیر زمانی(۳۰ ثانیه) برای اندازه‌گیری عمق پایدار پس از چرخش سریع، هماهنگ‌سازی و عدم انطباق بین تصاویرRGB و عمق زمینه‌ها و نقطه‌های دید در تصاویر ذکر کردند.

۳- ۱- ۲- تداخل سنجی

چاو و همکاران (Choi et al., 2014) یک سیستم ناوبری برای کمباین دروگر بر پایه LIDAR که بر روی یک سیستم شیبدار ۲۱ درجه نصب گردید، طراحی کردند. خطای سیستم تحت شرایط استاتیکی و دینامیکی به ترتیب با خطای میانگین مربع خطی (RMS) ۰/۰۲ و ۰/۰۷ متر گزارش شد. یین و همکاران (Yin et al., 2013) از دوربینTOF به عنوان سنسور هدایت اصلی برای وسیله نقلیه کشاورزی استفاده کرد که یک انسان را هدف‌گذاری و دنبال می‌کند. هدف از این سیستم تکمیل مفهوم سیستم‌های پایه و پیرو و چند رباتی بود.

۳- ۲- کشاورزی محصولات

با کمک سنسورهای سه‌بعدی بسیار بهینه‌تر می‌توان پارامترهای مهمی مانند سرعت رشد، برآورد زیست توده، ارتفاع، شکل، عرضه مواد مغذی و وضعیت سلامتی محصولات کشاورزی را تجزیه و تحلیل نمود، زیرا داده‌های بدست آمده می‌توانند برای اندازه‌گیری یا نمایش همبستگی پارامترهای ذکر شده مورد استفاده قرار گیرند. اخیرا لی و همکاران(Li et al., 2011) فنوتیپ گیاه را با روش‌های مختلف بینایی سه‌بعدی مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که یا کمک تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از کار آنها می‌توان فرآیند رشد فنوتیپی را تسریع کرد. راسل و سانز (Rosell et al., 2012) با تکنیک‌های سه‌بعدی‌سازی مشخصات هندسی محصولات درختی را بررسی کردند. وس و همکاران (Vos et al.,

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران

2007) مدل‌سازی گیاهان (گیاهان مجازی) را مورد بررسی قرار دادند که برای انجام آزمایش‌های مجازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، چرا که در غیر این صورت سال‌ها برای پیاده‌سازی و انجام آن در شرایط واقعی مزرعه زمان لازم است. تعدادی از پژوهش‌ها در این بخش به بازرسی کیفی و طبقه‌بندی محصولات کشاورزی مرتبط است. در این میان موردا و همکاران (Moreda et al., 2009) بررسی و مروری بر تکنولوژی‌های بینایی مختلف برای تعیین اندازه و درجه‌بندی محصولات داشتند. آنها انتظار دارند که تصویربرداری دوبعدی با رشدی روز افزون با روش‌های سه‌بعدی جایگزین شود و اسکنر سه‌بعدی چندطیفی (ترکیبی از داده‌های چند طیفی با بازسازی سطحی سه‌بعدی) یک تکنولوژی فراگیر در آینده باشد. بک و همکاران(Bac et al., 2014) روبات‌های برداشت محصولاتی با ارزش تجاری بالا را بررسی کردند. البته نسخه تجاری این دسته از ربات‌ها در حال حاضر برای برداشت توت‌فرنگی در دسترس است، اما مقدار نسبت قیمت به عملکرد، باید بهینه گردد تا مورد توجه کشاورزان قرار بگیرد.

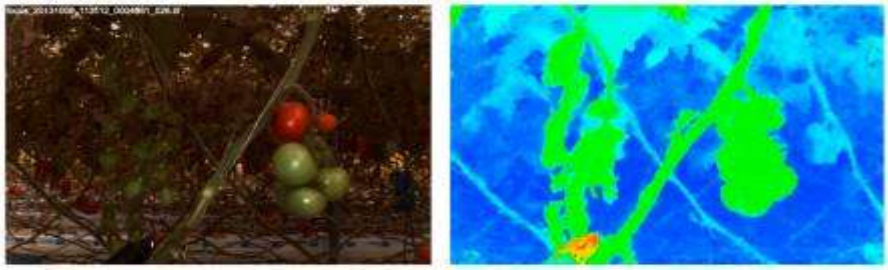
۱-۳-۲- مثلث سازی

از آنجاکه پهبادها در مقایسه با هواپیماها بسیار مقرون به صرفه بوده و همچنین تصاویری با وضوح بالاتر نسبت به تصاویر ماهواره‌ای تهیه می-کنند، پیش‌بینی می‌شود در گستره وسیعی از برنامه‌های تحقیقاتی و تجاری مورد استفاده قرار بگیرند. در این میان روش‌های مبتنی بر مثلث‌سازی با استفاده از پهبادها کاملا مورد بررسی قرار گرفته است. زارکو تجادا و همکاران (Zarco-Tejada et l., 2014) دوربین رنگی بدون فیلتر مادون-قرمز، نصب شده بر روی یک پهباد برای حصول رزولوشنی بالا (۵ سانتیمتر بر پیکسل) برای اندازه گیری ارتفاع کانوپی استفاده کردند. آنها ضریب تعیین R^2 را تا ۰/۸ در مقایسه با اندازه‌گیری دستی بدست آوردند و این ثابت می‌کند که این روش ارزان می‌تواند به اندازه LIDAR هوابرد که هزینه بالایی نیز دارد، صحت اندازه‌گیری بالایی داشته باشد. ناکارآمدی بالقوه این روش، همپوشانی تصاویر گرفته شده در ارتفاع بالا و نیاز به پرواز پهباد در ارتفاع‌های پایین است. گیپل و همکاران (Geipel et al., 2014) تصاویر هوایی را با استفاده از نوعی پهباد بدست آوردند و با اطلاعات سه‌بعدی که شامل اطلاعات طیفی RGB بود برای تخمین عملکرد دانه ذرت تلفیق دادند. آنها ضریب تعیین R^2 را تا ۰/۷۴ با استفاده از سه مدل رگرسیون خطی مختلف بدست آوردند که بیانگر این است که تولید نقاط ابری متراکم نیاز به قدرت محاسباتی بالایی دارد، بنابراین تصاویر را با ضریب نصف کاهش دادند.

برآورد خودکار عملکرد محصول، به ویژه در باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی باز، از اهمیت زیادی برخوردار است زیرا پارامتر بسیار مهمی برای مدیریت مزرعه است. از طرفی فعالیتی زمان‌بر و پرفشار است که نیازمند اتوماسیون است. هرروهورتا و همکاران (Herrero-Huerta et al., 2015) یک فرآیند اتوماتیک برای ارزیابی عملکرد باغ‌های تاکستان را با بدست آوردن پنج تصویر در یک محدوده نزدیک با یک دوربین و بازسازی خوشه پیشنهاد کردند، که گزارش نمودند عوامل محدودکننده اصلی بستگی به شرایط آب و هوایی دارد و استفاده از نور مصنوعی و نورافکن برای غلبه بر این محدویت‌ها را پیشنهاد کردند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2013) یک سیستم بینایی استریو خودگردان برای ارزیابی عملکرد یک باغ سیب استفاده کردند که در شب با استفاده از حلقه‌های نور چشمک‌زن برای روشن کردن صحنه کار می‌کند، آنها مشکلاتی را به دلیل وجود موانع، انعکاس‌های درخشان، ناهمگنی رنگ و بایاس در شکل الگوریتم استریو گزارش کردند که باعث می‌شد محل قرارگیری سیب را نسبت به دوربین نزدیک‌تر از مقدار واقعی نشان دهد. برای حل مشکل بایاس، آنها بجای هر سه درخت، یک نشان مصنوعی را برای کالیبراسیون سیستم بینایی قرار دادند.

امروزه مدل‌های سه‌بعدی درختان، ساختارهای گیاهی و کشاورزی بسیار مورد نیاز است، زیرا آنها روشی کارآمد به جای آزمایش‌های دشوار و گران‌قیمت هستند. شبیه‌سازی مجازی برای ایجاد یک مدل مبتنی بر اطلاعات واقعی به منظور راه‌اندازی برنامه‌های کاربردی رباتیک مانند برداشت، تنک کردن، هرس و غیره نیاز به اطلاعات سه‌بعدی ساختارهای کشاورزی دارد. فنوتیپ گیاهی نه تنها برای افزایش بهره‌وری محصولات بلکه برای کاهش اثرات گرم شدن کره زمین در کشاورزی آینده نیز اهمیت بالایی دارد. جین و تانگ (Jin et al., 2009) یک سیستم اندازه‌گیری فاصله میان گیاهان ذرت برای کاشت مجدد در مراحل اولیه با استفاده از دید استریو ایجاد کردند. این سیستم قادر به تشخیص تقریبا ۹۶٪ از گیاهان ذرت بود اما دقت کمتری در تشخیص موقعیت مرکزی فاصله بین دو بوته (۶۲٪ تا ۷۴٪) با زمان پردازش بین ۵ تا ۲۰ ثانیه دارد. ترکیبی از اطلاعات سه‌بعدی شکل و اطلاعات طیفی برای مدیریت مزرعه مفید است که می‌توان این اطلاعات را از زمین یا از هوا بدست آورد. جیانگ و همکاران (Jiang et al., 2009) یک روش سنتی تشخیص دو بعدی را با سیستم دید سه‌بعدی را بر اساس شکل از سایه مقایسه کردند. در نتیجه، با استفاده از رویکرد سه‌بعدی، میزان خطای کلی ۳۰٪ کاهش یافت، اما با توجه به سرعت بالای سیب بر روی نوار نقاله، اثر زیگزاگ در مرز سیب تولید شد. پولدر و هوفستی (Polder et al., 2014) همچنین یک دوربین نور را برای فنوتیپ گیاه گوجه فرنگی در یک گلخانه مورد ارزیابی قرار دادند (شکل ۴) و چندین معایب را مانند محاسبه (محاسبه تصویر عمق) و از لحاظ اقتصادی گران بودن، نیاز به تنظیم دیافراگم و زمینه دید محدود بیان کردند.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون ایران



شکل ۴- RGB (سمت چپ) و تصویر عمق (راست) با استفاده از یک دوربین نور زمینه (Polder et al., 2014)

۳ -۲ -۲ - *زمان پرواز*

با توجه به استفاده از روبات‌های پویشی، گاریدو و همکاران (Garrido et al., 2015) گیاهان ذرت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها ابرهای نقطه‌ای LIDAR، یک ربات میدانی برای کسب اطلاعات و همچنین یک ایستگاه رادیویی برای تعیین مکان جغرافیایی ابرهای نقطه‌ای، را بکار گرفتند و با تکیه بر ترکیب سنسور، فیلتر کردن و پردازش، ساختار سه‌بعدی گیاه را بازسازی کردند و نتیجه‌گیری کردند که جهت‌گیری سنسور سه‌بعدی بسیار مهم است. ویز و همکاران (Weiss et al., 2010) یک لیدار سه‌بعدی با رزولوشن پایین برای ارزیابی طبقه‌بندی‌های مختلف آموزش ماشین در یک محیط داخلی مانند گلخانه استفاده کردند. آنها با استفاده از شش گونه مختلف گیاهی، طبقه‌بندی با دقت تقریبی ۹۹٪ را با یکی از طبقه‌بندی‌های آموزش دیده (رگرسیون منطقی ساده) بدست آوردند. سپس، برای شناسایی گیاه و نقشه‌برداری در شرایط محیطی باز با میزان تشخیص گیاه حدود ۶۰٪ از همان لیدار سه‌بعدی استفاده کردند. اگر چه میزان تشخیص گیاه در میدان باز نتیجه قابل توجهی نداشت و رزولوشن پیکسل سنسور ضعیف بود (۵۹×۲۹ پیکسل)، اما نویسندگان بر مزایای سنسور (قابلیت اطمینان در شرایط نور و آب و هوایی مختلف) تاکید کردند و آن را به عنوان مهم‌ترین تکنولوژی سنسور با آینده‌ای امیدوارکننده برای روباتیک کشاورزی مطرح نمودند (Weiss et al., 2011). آن‌ها تراکم محصول را با آزمایش در تراکم‌ها سرعت‌ها و ارتعاشات مختلف (اما کنترل شده) توانستند با موفقیت پیش‌بینی کنند. ناکارمی و تانگ (Nakarmi et al., 2012) یک سیستم برای سنجش فاصله بین گیاهان را با استفاده از دوربین پیشرفته TOF ساختند که برای محافظت از نور مستقیم و باد کاملا پوشیده و محافظت شده بود. آن‌ها دوربین‌های TOF را نسبت به یک سنسور تصویری معمولی استریو، برتر و همچنین محدودیت‌هایی را مانند میدان کوچک دید و رزولوشن پیکسل کم است ذکر کردند. آدهیکاری و کارکه (Adhikari et al., 2011) یک سیستم تصویربرداری سه‌بعدی برای هرس اتوماتیک برای شناسایی شاخه‌های اضافه و ایجاد نقاط هرس در یک باغ سیب آموزشی ایجاد کردند..٪۹۰ از نقاط برش با استفاده از یک دوربین TOF به درستی شناسایی شده بودند. گونگال و همکاران (Gongal et al., 2014) تلفیق یک دوربین دوبعدی با یک دوربینTOF برای تخمین عملکرد درختان سیب در باغ‌های آموزشی مورد بررسی قرار دادند. این سیستم در زمانی که تصاویر از هر دو طرف سایبان درختی گرفته شده بود (و نه تنها از یک سمت) قادر به تشخیص ۸۸٪ از سیب‌ها بود. اما آن‌ها اذعان کردند که چالش اصلی دید محدود از سیب‌ها بود، چرا که برخی از سیب‌ها به طور کامل توسط برگ و شاخه‌ها پوشیده شده بودند.

۳-۲-۳- *تداخل سنجی*

مدتی طولانی است که از تداخل‌سنجی برای اندازه‌گیری رشد گیاه یا تغییرات حرکتی تحت محرک‌های مختلف استفاده می‌گردد. در حال حاضر، روش‌های تداخل‌سنجی با رویکرد سه‌بعدی‌سازی برای بازرسی دانه‌ها و کنترل کیفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. پژوهش لی و همکاران (Lee , et al., 2011) با استفاده از توموگرافی به‌هم‌پیوسته نوری (OCT[12]) براساس تداخل‌سنجی نور سفید برای تشخیص دانه‌های خربزه آلوده، تاکنون، یکی از معدود نمونه‌های بازسازی سه‌بعدی با استفاده از تداخل‌سنجی در کشاورزی است (شکل ۵). آن‌ها سپس برای دانه‌های خیار هم همین آزمایش را انجام دادند (Lee et al., 2012). باربوسا و لینو (Barbosa et al., 2007) از تداخل‌سنج الکترونی نقطه‌ای (ESPI[13]) برای اندازه‌گیری سه‌بعدی شکل هلو استفاده کردند و نتیجه گرفتند که این روش برای کنترل کیفیت محصولات کشاورزی با بافتی صاف و ظریف رضایت‌بخش است.

تجزیه و تحلیل حرکات گیاه دیگر کاربرد این تکنولوژی است، جایی که فاکس و همکاران (Fox et al., 1977) براساس تداخل‌سنجی هولوگرافی برای اندازه‌گیری تغییرات حرکتی یک گیاه بالغ *Stapelia variegate* تحت محرک‌های فتوتراپی، مورد بررسی قرار دادند، در حالی که از یک شی مرجع ساکن نیز برای تشخیص حرکات ناخواسته استفاده کردند. از طرفی پژوهشی توسط تیلاکارتن و همکاران (Thilakarathne et al., 2014) براساس تداخل‌سنجی نور سفید برای بررسی آسیب برنج تحت غلظت‌های مختلف ازن و برای اندازه‌گیری نوسانات ذاتی نانومتری آن

[12] Optical Coherence Tomography
[13] Electronic Speckle Interferometry

صورت گرفت. آن‌ها توضیح دادند که استفاده از تداخل‌سنجی با دو عامل محدودکننده اصلی رو به رو است: پیچیدگی اجرا و خواص نوری خود گیاه (سطح بسیار پراکنده).

شکل ۵- بازسازی سه بعدی دانه های خربزه براساس تداخل‌سنجی

۳-۳- دامپروری

۱-۳-۳- مثلث سازی

طی دو دهه گذشته ربات‌های شیردوشی رشد چشمگیری تا به امروز داشته‌اند و تنها ربات‌های تجاری موجود در کشاورزی بوده‌اند. ربات‌های فعلی شیردوشی برای ترسیم موقعیت محل قرارگیری از ورقه نوری مثلث‌سازی استفاده می‌کنند اما برخی از آزمایش‌ها جایگزین‌هایی را ارزیابی کرده‌اند. اخلوفی (Akhloufi, 2014) دو دوربین TOF و CTS را مقایسه کرد، که نوع دوم نتیجه بهتری را به دلیل پیکسل و خروجی رنگ بهتر آن ارائه می‌دهد. در کشتارگاه‌ها اتوماسیون امکان استفاده از روش‌های نور ساختاریافته را برای برش، مرتب‌سازی و محاسبه عملکرد گوشت افزایش داده است، زیرا این فعالیت‌ها عمدتا در محیط‌های داخلی انجام می‌شود که در آن شرایط روشنایی قابل کنترل است. نظارت بر دام توسط وی‌آزی و همکاران مورد بحث قرار گرفت (Viazzi et al., 2014) که یک دوربین دو بعدی با CTS را برای تشخیص نقص لنگیدن احشام مورد استفاده قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که رویکرد سه‌بعدی محدودیت‌های دوبعدی را برطرف می‌کند، اما از طرفی CTSها دارای محدودیت‌هایی مانند حساسیت به نور خورشید و میدان دید کوچک هستند. کوآسو و همکاران (Kawasue et al., 2013) از سه CTS برای ارزیابی کیفیت احشام تا اطمینان ۹۳٪ در مقایسه با اندازه‌گیری دستی استفاده کردند. دراین روش یک منبع مهم خطا ناشی از موی بدن احشام بود. به طور مشابه، کوزوهارا و همکاران (Kuzuhara et al., 2014) از یک CTS برای تخمین پارامترهای توده زیستی و تولید شیر گاوهای هلشتاین استفاده کرد. آن‌ها ضریب تعیین R^2 برای وزن بدن را ۰/۸ و برای تولید شیر ۰/۶۲ بدست آوردند. در این تحقیق محدودیت‌هایی را در مورد حساسیت سنسور به نور طبیعی ذکر می‌کنند، اما این مسئله با انجام آزمایشات داخل گاوداری حل شده است. شرایط نگهداری مناسب حیوانات، نظارت بر سلامت،ربات‌های هدایت در محیط‌های داخلی، ربات‌های تغذیه و تمیزکردن، تنها چند نمونه از وظایف بسیاری است که در آن‌ها سنسورهای سه-بعدی در بخش دامپروری می‌توانند بکار گرفته شوند. از آنجایی‌که در بیشتر اوقات اندازه‌گیری‌ها می‌تواند در یک محیط داخلی انجام شود، می‌توان از چندین روش تصویربرداری سه‌بعدی استفاده کرد. صنعت دامپروری اخیراً پیشرفت‌هایی در ارزیابی و نظارت بر کیفیت حاصل کرده است، اما هنوز به توسعه سیستم‌های نظارت یکپارچه نیاز مبرمی وجود دارد . سیستمی که بتواند پارامترهای مهمی شامل متغیرهای فیزیولوژیکی مانند شکل، اندازه و وزن را اندازه‌گیری کند.

تولیدات آبزی‌پروری در حال حاضر تقریبا ۵۰٪ از ماهی‌های مصرف شده در جهان را تامین می‌کند و کشاورزان این بخش در نظارت بر ذخایر ماهی خود با مشکلات زیادی مواجه هستند. بر اساس یک بررسی توسط زیون (Zion, 2012)، چندین سیستم بینایی استریو برای اندازه‌گیری ابعاد و وزن یک ماهی مشخص شده است. بهبود بیشتر آن‌ها می‌تواند منجر به توسعه سیستمی شود که قادر به برآورد زیست توده کلی و نظارت شرایط نگهداری ماهی باشد. با این حال، مشکلات مانند تلاقی ماهی‌ها و شفافیت پایین آب باید مورد توجه قرار گیرد.

۲-۳-۳- زمان پرواز

از این روش در تحقیق بر روی ساخت یک ربات برای گاو شیرده انجام شده است (Underwood et al., 2013). در این ربات یک لیدار ۳۶۰ درجه سه‌بعدی به عنوان سنسور اصلی استفاده شد و جوانب متعددی مانند پاسخ گاوها به حضور یک ربات، عملیات کنترل از راه دور و الگوریتم-های نرم‌افزاری برای تشخیص و ردیابی احشام مورد بررسی قرار گرفت. پس از اجرای آزمایش‌ها بر روی سه گله ، نویسندگان نشان دادند که کنترل گله از راه دور با این روش امکان‌پذیر است و در عین حال پتانسیلی برای بهبود شرایط نگاهداری حیوانات نیز دارد.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران

۴- بحث

موسسه فناوری اتریش (Belbachir et al., 2014) به تازگی یک دوربین بینایی استریو ایجاد کرده است که با چرخش مداوم یک دید ۳۶۰ درجه‌ای سه‌بعدی در زمان واقعی تولید کند. این دوربین از نرخ نمونه‌برداری بالا و قابلیت تاخیری کم سنسور بینایی دینامیکی[14] (DVS) بهره می-گیرد که فقط تغییرات در یک سطح پیکسل را، که ناشی از حرکت است، ایجاد می‌کند و به طور قابل توجهی میزان داده‌های بدست آمده را کاهش می‌دهد. در مورد سنسورهای مبتنی بر مثلث، نقشه عمق می‌تواند به عنوان یک فرآیند خروجی تولید شود، بنابراین اندازه‌گیری‌ها در زمان واقعی می‌تواند انجام شود. هر سنسور دید سه‌بعدی دارای مزایا و معایبی است، بنابراین ترکیب سنسور سه‌بعدی با یک مکمل بسته به کاربرد، عملکرد قوی‌تری خواهد داشت. همچنین هیچ سنسور سه‌بعدی کاملا ایمنی نسبت به نویزهایی مانند نور طبیعی، تغییرات شدت نور خورشید، شرایط آب و هوایی نامطلوب (باران، برف، گرد و غبار) و تفاوت‌های بازتاب نور (به علت رنگ و بافت) وجود ندارد. دوربین‌های TOF با رزولوشن بالاتر در حال حاضر از لحاظ تجاری در دسترس هستند و به رزولوشن ۴/۲ مگاپیکسل می‌رسند. در نهایت سنسورهای سه‌بعدی در زمینه اتوماسیون کشاورزی و تحقیقات رباتیک با وجود محدودیت‌هایی که در فضای باز دارند تاثیرگذار و مفید هستند.

۵- نتیجه گیری

در حال حاضر سنسورهای سه‌بعدی کوچکتر، هوشمندتر و ارزان‌تر شده‌اند. بنابراین، در صورت انجام کافی تحقیقات، پیشرفت‌های تکنولوژیکی امکان‌پذیر است. از آنجایی که محیط‌های کشاورزی به طور قابل ملاحظه‌ای پیچیده‌اند، بینایی سه‌بعدی می‌تواند نقش مهمی در ادراک پیشرفته داشته باشد که مناسب برنامه‌های کاربردی در هر بخشی از کشاورزی باشد. ارزش واقعی اطلاعات سه‌بعدی به طور دقیق در قابلیت‌های حسگرهای برتر در مقایسه با دوبعدی قرار دارد. پیش‌بینی می‌شود تا پایان این دهه بازار سودآوردی در مورد موضوعاتی نظیر نورپردازی LED، سنسورهای سه‌بعدی، هواپیماهای بدون‌سرنشین و اتوماسیون و رباتیک کشاورزی وجود داشته باشد. هم‌جوشی بخش دوبعدی و سه‌بعدی بسیار امیدوارکننده است، زیرا مزایای هر دو روش را بدست می‌آورد و ثابت شده است که برای به‌دست آوردن اطلاعات بیشتر در مورد سطح شی یا برای تسهیل روند تقسیم‌بندی تصویر مفید است. تمام سنسورهای سه‌بعدی به نور خورشید حساسیت دارند، اما برای کاهش آن و متوقف کردن استفاده از دستگاه-های سایه‌انداز نیاز به تحقیقات بیشتری است. البته، یک اثر مثبت این حساسیت این است که کشاورزی خودگردان در شب می‌تواند به طور کامل مورد بررسی قرار گیرد چرا که سنسورهای سه‌بعدی به درستی در این محیط رفتار می‌کنند.

نرخ تغییرات در تکنولوژی تصویربرداری سه‌بعدی تسریع شده است، بنابراین امکان استفاده از این تکنولوژی بسیار زیاد است. بنا به عواملی مانند کمبود کار، کمبود منابع طبیعی و تقاضای مصرف‌کنندگان برای محصولات با کیفیت، نیاز به اتوماسیون را در کشاورزی افزایش یافته است. از آنجایی که بینایی سه‌بعدی چشم‌انداز یک تکنولوژی کلیدی برای اتوماسیون است، هنوز اجرای تحقیقات بیشتری لازم است.

۶- مراجع

1- Edan Y., Han S., Kondo N. (2009). Automation in agriculture. Handbook of Automation. pp. 1095–1128: Springer
2- Eddershaw T. (2014). *IMAGING & Machine Vision Europe*. Europe Science; Cambridge, UK.
3- Bellmann A., Hellwich O., Rodehorst V., Yilmaz U.(2007). *A Benchmarking Dataset for Performance Evaluation of Automatic Surface Reconstruction Algorithms* IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, Minneapolis, USA.
4- Schwarte R., Heinol H., Buxbaum B., Ringbeck T. (1999).Principles of Three-Dimensional Imaging Techniques. *Handbook of Computer Vision and Applications*. (: pp. 464–482) Heidelberg, Germany.
5- Nayerifard T., (2015) *3D profile extraction of soil surface using laser based on digital image processing*. MS. Thesis, Department of Biosystem Engineering, Bu-Ali Sina University (Persian)
6- Griepentrog H.W., Andersen N.A., Andersen J.C., Blanke M., Heinemann O., Nielsen J., Pedersen S.M., Madsen T.E., Wulfsohn D.(2009). *Safe and Reliable—Further Development of a Field Robot*; 7th European Conference on Precision Agriculture (ECPA); Wageningen, The Netherlands
7- Kise M., Zhang Q., Rovira Más F.(2005) A Stereovision-based Crop Row Detection Method for Tractor-automated Guidance. *Biosystem Engineering, 90*, 357–367
8- Rovira-Más F., Han S., Wei J., Reid J.F. (2007). Autonomous guidance of a corn harvester using stereo vision. *Agriculture Engineering CIGR E-journal*, 9, 1–13.
9- Hanawa K., Yamashita T., Matsuo Y., Hamada Y. (2012) Development of a stereo vision system to assist the operation of agricultural tractors. *Japan. Agriculture. Res. Q. JARQ, 46*, 287–293.
10- Blas M.R., Blanke M. (2011). *Stereo vision with texture learning for fault-tolerant automatic baling*. Computer.

[14] Dynamic Vision Sensor

Electronic, Agriculture, 75, 159–168.
11- Wang Q., Zhang Q., Rovira-Más F., Tian L.(2011) Stereovision-based lateral offset measurement for vehicle navigation in cultivated stubble fields. *Biosystem Engineering*, 109, 258–265.
12- Reina G., Milella A. (2012) Towards autonomous agriculture: Automatic ground detection using trinocular stereovision. *Sensors, 12*, 12405–12423.
13- Yang L., Noguchi N. (2012) Human detection for a robot tractor using omni-directional stereo vision. *Computer, Electronic, Agriculture, 89*, 116–125
14- Nissimov S., Goldberger J., Alchanatis V. (2015). Obstacle detection in a greenhouse environment using the Kinect sensor. *Computer, Electronic, Agriculture, 113*, 104–115.
15- Choi J., Yin X., Yang L., Noguchi N. (2014). Development of a laser scanner-based navigation system for a combine harvester. *Engineering, Agriculture, Environment, Food, 7*, 7–13.
16- Yin X., Noguchi N., Choi J. (2013) Development of a target recognition and following system for a field robot. *Computer, Electronic, Agriculture, 98*, 17–24.
17- Li L., Zhang Q., Huang D. (2011) A review of imaging techniques for plant phenotyping. *Sensors, 14*, 20078–20111.
18- Rosell J.R., Sanz R. (2012) A review of methods and applications of the geometric characterization of tree crops in agricultural activities. *Computer, Electronic, Agriculture, 81*, 124–141.
19- Vos J., Marcelis L., de Visser P., Struik P., Evers J. (2007*). Functional–Structural Plant. Modelling in Crop. Production*. Volume 61 Springer; Wageningen, The Netherlands.
20- Moreda G.P., Ortiz-Cañavate J., García-Ramos F.J., Ruiz-Altisent M. (2009). Non-destructive technologies for fruit and vegetable size determination—A review. *Food Engineering, 92*, 119–136.
21- Bac C.W., van Henten E.J., Hemming J., Edan Y. (2014). Harvesting Robots for High-value Crops: State-of-the-art Review and Challenges Ahead. *Field Robot, 31*, 888–911.
22- Zarco-Tejada P.J., Diaz-Varela R., Angileri V., Loudjani P. (2014). Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods*European Journal of Agronomy, 55*, 89–99.
23- Geipel J., Link J., Claupein W. (2014). Combined spectral and spatial modelling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote Sensors, 6*, 10335–10355.
24- Herrero-Huerta M., González-Aguilera D., Rodriguez-Gonzalvez P., Hernández-López D. (2015). Vineyard yield estimation by automatic 3D bunch modelling in field conditions. *Computer, Electronic, Agriculture, 110*, 17–26.
25- Wang Q., Nuske S., Bergerman M., Singh S. (2013) *Experimental Robotics:* Springer International Publishing
26- Jin J., Tang L (2009). Corn plant sensing using real-time stereo vision. *Journal of Robotics, 26*, 591–608.
27- Jiang L., Zhu B., Cheng X., Luo Y., Tao Y.(2009). 3D surface reconstruction and analysis in automated apple stem-end/calyx identification. *Trans. ASABE, 52*, 1775–1784.
28- Polder G., Hofstee J.W. (2014). Phenotyping large tomato plants in the greenhouse usig a 3D light-field camera. *ASABE CSBE/SCGAB Annu. Int. Meet, 1*, 153–159.
29- Garrido M., Paraforos D.S., Reiser D., Arellano M.V., Griepentrog H.W., Valero C. (2015). 3D Maize Plant Reconstruction Based on Georeferenced Overlapping LiDAR Point Clouds. *Remote Sensors, 7*, 17077–17096.
30- Weiss U., Biber P., Laible S., Bohlmann K., Zell A., Gmbh R.B. (2010). *Plant Species Classification using a 3D LIDAR Sensor and Machine Learning.* Machine Learning and Applications. IEEE; Washington, DC, USA.
31- Weiss U., Biber P. (2011). Plant detection and mapping for agricultural robots using a 3D LIDAR sensor. *Robotics and Autonomous Systems, 59*, 265–273.
32- Nakarmi A., Tang L. (2012). Automatic inter-plant spacing sensing at early growth stages using a 3D vision sensor. *Computer, Electronic, Agriculture, 82*, 23–31.
33- Adhikari B., Karkee M.(2011). 3D Reconstruction of apple trees for mechanical pruning. *ASABE Annu. Int. Meet, 7004*.
34- Gongal A., Amatya S., Karkee M. (2014) *Identification of repetitive apples for improved crop-load estimation with dual-side imaging*; Montreal, QC, Canada.
35- Lee C., Lee S.-Y., Kim J.-Y., Jung H.-Y., Kim J. (2011). Optical sensing method for screening disease in melon seeds by using optical coherence tomography. *Sensors, 11*, 9467–9477.
36- Lee S.-Y., Lee C., Kim J., Jung H.-Y. (2012). Application of optical coherence tomography to detect Cucumber green mottle mosaic virus (CGMMV) infected cucumber seed. *Horticulture, Environment, Biotechnology, 53*, 428–433.
37- Barbosa E.A., Lino A.C.L. (2007). Multiwavelength electronic speckle pattern interferometry for surface shape measurement *Applied Optics, 46*, 2624–2631.
38- Fox M.D., Puffer L.G. (1977). Holographic interferometric measurement of motions in mature plants. *Plant. Physiology, 60*, 30–33.

39- Thilakarathne B.L.S., Rajagopalan U.M., Kadono H., Yonekura T. (2014). An optical interferometric technique for assessing ozone induced damage and recovery under cumulative exposures for a Japanese rice cultivar. *Springerplus*, *3*, 89.
40- Akhloufi M. (2014). *3D vision system for intelligent milking robot automation*; Proceedings of the Intelligent Robots and Computer Vision XXXI: Algorithms and Techniques; San Francisco, CA, USA.
41- Viazzi S., Bahr C., van Hertem T., Schlageter-Tello A., Romanini C.E.B., Halachmi I., Lokhorst C., Berckmans D. (2014) Comparison of a three-dimensional and two-dimensional camera system for automated measurement of back posture in dairy cows. *Computer, Electronic, Agriculture*, *100*, 139–147.
42- Kawasue K., Ikeda T., Tokunaga T., Harada H. (2013). Three-Dimensional Shape Measurement System for Black Cattle Using KINECT Sensor. *International journal circuits systems and signal processing*, *7*, 222–230
43- Kuzuhara Y., Kawamura K., et al. (2014). A preliminarily study for predicting body weight and milk properties in lactating Holstein cows using a three-dimensional camera system. *Computer, Electronic, Agriculture*, *111*, 186–193.
44- Zion B. (2012). The use of computer vision technologies in aquaculture-A review. *Computer, Electronic, Agriculture*, 88, 125–132.
45- Underwood J., Calleija M., Nieto J., Sukkarieh S. (2013). *A robot amongst the herd: Remote detection and tracking of cows*. Proceedings of the 4th Australian and New Zealand symposium; Camden, Australia.
46- Belbachir A.N., Ieee M., Schraml S., Mayerhofer M., Hofstätter M. (2014) *A Novel HDR Depth Camera for Real-time 3D 360° Panoramic Vision*. IEEE; Columbus, OH, USA.

یازدهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم (ماشین‌های کشاورزی) و مکانیزاسیون ایران