

طراحی و ارزیابی عملکرد الگوریتم تشخیص مسیر در تصاویر جاده‌ای با استفاده از تبدیل هاف

سعید مینایی*^۱، علیرضا مهدویان^۲، احمد بناکار^۳

۱. دانشیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۲. دانشجوی دکتری گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

۳. استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱۱/۲۱)

چکیده

به‌کارگیری سامانه‌های هدایت خودکار در بخش کشاورزی از سودمندترین موارد این سامانه‌ها است. در این پژوهش به طراحی و ارزیابی الگوریتم ماشین بینایی مبتنی بر برداشت تصویر از دوربین نصب‌شده در جلوی کابین دروگر JD955 و یافتن مسیر پیشروی کمباین پرداخته شد. در این الگوریتم پس از برداشت تصویر، اعمال صافی‌ها، و بهینه‌سازهای لازم، به کمک تبدیل هاف مسیر پیشروی به صورت یک خط از تصویر استخراج شد. سپس انحراف جانبی و انحراف زاویه‌ای کمباین در مقایسه با مسیر مورد نظر به عنوان مؤلفه‌های کنترلی لازم سامانه هدایت خودکار کمباین، محاسبه شدند. الگوریتم مسیریابی در هفت تیمار انحراف جانبی و هفت تیمار انحراف زاویه‌ای و در سه تکرار ارزیابی شد. این ارزیابی در وضعیت‌های متفاوت نور روز انجام شد. پس از مقایسه مقادیر استخراج‌شده از پردازش تصاویر به وسیله الگوریتم با زوایا و انحراف‌های اندازه‌گیری‌شده به روش دستی، مشخص شد که این الگوریتم توانسته است با دقت ۹۸ درصد مسیر پیشروی کمباین را تشخیص دهد.

کلیدواژگان: تبدیل هاف، تشخیص مسیر، کمباین، ماشین بینایی، هدایت خودکار.

مقدمه

کشاورزان برای دروکردن محصولات خود عمدتاً از کمباین استفاده می‌کنند. در به‌کارگیری کمباین برای درو محصولات، لبه تیغه‌های برش کمباین باید روی ردیف برش قبلی قرار گیرد، که این عمل با استفاده از تجربه راننده انجام می‌شود.

گروهی از پژوهشگران در تحقیقی الگوریتمی ارائه کردند که از آن برای هدایت کمباین برداشت ذرت در روز و شب استفاده شد. کمباین استفاده‌شده از نوع 2188Case و تمام شیرهای سیستم هدایت آن از نوع الکتروهیدرولیک بودند. در این پژوهش به منظور هدایت کمباین با موفقیت از سامانه هدایت خودکاری مجهز به دوربین نصب‌شده بر اتاقک راننده استفاده شد. با بررسی عملکرد سامانه هدایت خودکار در برداشت ۴/۶ هکتار ذرت مشخص شد دقت هدایت سامانه پیشنهادی و سامانه GPS تجاری موجود روی کمباین از دیدگاه آماری مشابه بوده است (Benson et al. 2001). در تحقیق دیگری به منظور هدایت خودکار ماشین برداشت علوفه از سامانه مجهز به حسگر RTK-GPS بهره گرفته شد، ارزیابی در شرایط مزرعه‌ای نشان

داد که انحراف از معیار برای سامانه هدایت خودکار در تمام آزمایش‌ها کمتر از ۱۰۰mm بوده است و همچنین با افزایش سرعت پیشروی از یک به دو متر در ثانیه، میزان انحراف مسیر از ۲۵ میلی‌متر به ۶۹ میلی‌متر افزایش می‌یابد (Stoll & Heinz, 2000). در سال ۲۰۰۸ گروهی از پژوهشگران با طراحی سامانه‌ای موفق به تشخیص مناسب ردیف‌های کشت و علف‌های هرز روی ردیف شدند. این پژوهش که از دوربین RGB به عنوان حسگر ورودی بهره برد، در دو مرحله انجام شد. در مرحله اول ردیف‌های کشت به کمک تبدیل هاف از تصویر زمینه جدا شدند و در مرحله دوم علف‌های هرز به کمک آنالیز رنگ نقطه‌ای از محصول تفکیک شد. این دو تکنیک (تبدیل هاف و آنالیز رنگ نقطه‌ای) توانستند به خوبی وظایف خود را انجام دهند و دستگاه سم‌پاش مزرعه‌ای را قادر به سم‌پاشی در حال حرکت ساختند (Gee et al., 2008).

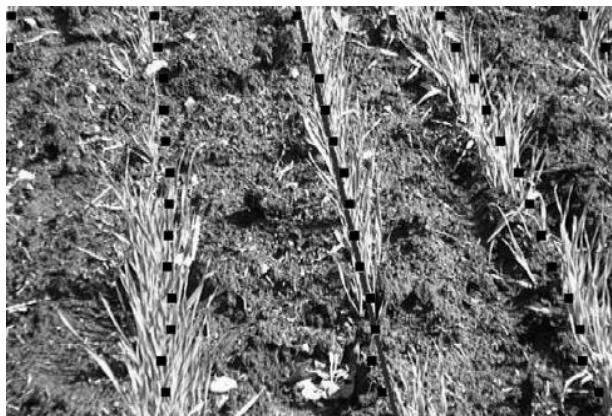
در سال ۱۹۹۹ سیستم ماشین بینایی گزارش شد که با هدف نهایی تشخیص حجم و سطح پوششی علف هرز مزرعه در حال حرکت به منظور سم‌پاشی موضعی علف‌های هرز طراحی شد. در این پژوهش از دو دوربین تک‌رنگ به عنوان حسگر استفاده شد و دوربین‌ها در ارتفاع یک الی دو متری زمین نصب شدند. سطح سلول‌های تحت کنترل در این پژوهش

سامانه اولین مسیر را راننده باید طی کند تا به عنوان مسیر اول ثبت شود و خطوط بعدی حرکت در مسیرهای موازی توسط راننده هدایت می‌گردد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد مارکر دیجیتال با دقت بیشتری تراکتور را هدایت کرده است و همچنین افزایش سرعت پیشروی دقت هدایت را کاهش داده است (Bande and Minaei, 2005).

روش‌های گوناگونی برای شناسایی ردیف کشت و یا مسیر پیشروی با ماشین بینایی وجود دارد. دو مورد از کاربردی‌ترین روش‌هایی که تاکنون پژوهشگران ارائه کرده‌اند، عبارت‌اند از:

الف) روش تعیین خطوط موازی (Stripe Analysis)

روش Stripe Analysis که برای نخستین بار توسط سوگارد و اولسن پیشنهاد شد بر این اصل استوار است که محلی از تصویر که ردیف کشت در آن قرار دارد در مقایسه با بقیه نقاط، شدت روشنایی (Intensity) بیشتری دارد (Søgaard and Olsen, 2003). پس از آماده‌سازی، تصویر به نوارهایی تقسیم می‌شود که به صورت ردیفی در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند. پس از شناسایی نقاط دارای بیشینه مقدار خاکستری، با استفاده از مختصات آن‌ها و رگرسیون خطی، خط برازش این نقاط محاسبه شده و روی تصویر انداخته می‌شود (شکل ۱).



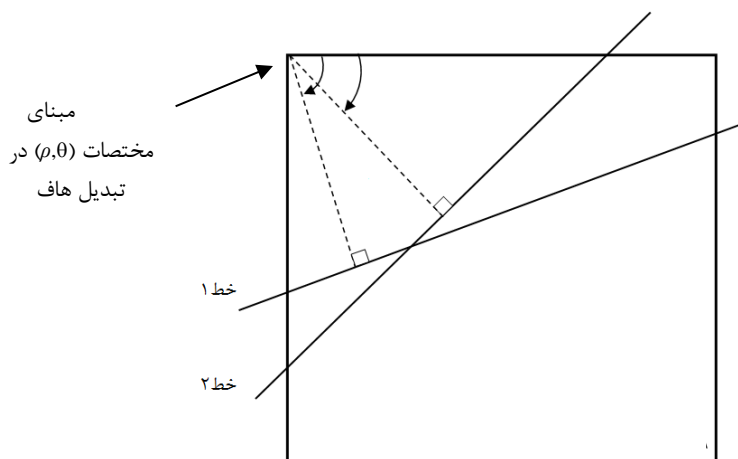
شکل ۱۰. خط برازش شده نقاط، حاصل اعمال الگوریتم خطوط موازی بر تصویر

ب) روش تبدیل هاف (Hough Transform)

در این روش نیز، ابتدا عملیات تصویربرداری انجام می‌شود و پس از جداسازی زمینه از گیاه اصلی، تبدیلات مورد نظر روی تصویر اعمال می‌گردد. با اعمال تبدیل هاف، مختصات کارتزین به مختصات قطبی تبدیل می‌شود و خطوط موجود تصویر استخراج می‌گردد. مقدار زاویه خط (θ) و فاصله آن از مبدأ (ρ) خروجی‌های حاصل از تابع تبدیل هستند. بنابراین مطابق شکل ۲ هر خط در فضای دکارتی با مختصات (ρ, θ) در خروجی تبدیل هاف نشان داده می‌شود.

$25 \times 34 \text{ cm}^2$ گزارش شده است. این سامانه توانسته است با تشخیص صحیح ردیف‌های کشت و گیاهان کشت شده در شرایط مزرعه‌ای و در پوشش ۵۰٪ درصد سطحی از علف هرز موجب صرفه‌جویی ۴۸ درصدی در علف‌کش مصرفی شود. (Tian *et al.*, 1999). در تحقیقی دیگر از تبدیل هاف به منظور تشخیص ردیف درختان در باغات میوه استفاده شد. در این پژوهش استفاده از تبدیل هاف مبنای سامانه تشخیص مسیر قرار گرفت. با نصب سامانه هدایت خودکار مبتنی بر حسگر لیزری دوبعدی بر تراکتور باغی ۵۲kW، مشخص شد این سامانه توانسته است تراکتور را با دقت جانبی ۰/۱۱ سانتی‌متر و زاویه‌ای ۱/۵ درجه هدایت کند (Barawid *et al.*, 2007). در پژوهش دیگری که با هدف طراحی سامانه ماشین بینایی به منظور تشخیص و رهگیری هدف زمینی انجام شد، خطای مربع میانگین ریشه (RMSE) انحراف جانبی و انحراف زاویه‌ای به ترتیب ۱/۰ متر و ۱/۳ درجه گزارش شد. آزمایش خودرو باربری مزرعه‌ای مجهز به سامانه کنترلی هدایت خودکار PID در سرعت پیشروی هدف زمینی ۱/۱ m/s انجام شد (Yin *et al.*, 2013). استفاده از سامانه‌های هدایت خودکار فقط به کاهش وظایف راننده ختم نشد، بلکه در پژوهش‌هایی از این سامانه‌ها در تحقیق روی الگوهای حرکتی خودروها در مزرعه نیز استفاده شده است. در تحقیقی با تعریف ۷ الگوی متفاوت گردش در سرگاه‌های زمین زراعی برای سامانه هدایت خودکار تراکتور، در مرحله اول مشخص شد امکان گردش با تمامی الگوها به وسیله سامانه وجود دارد و در مرحله بعد مقایسه‌ای بین زمان و مسافت پیموده شده در هر الگو انجام پذیرفت (Sabelhaus *et al.*, 2013).

پژوهش انجام شده در زمینه هدایت خودکار تراکتور از جمله تحقیقات انجام شده در زمینه هدایت خودکار در ایران است. در این پژوهش از چرخ زمین‌گرد و سامانه کنترل الکترونیکی به منظور هدایت تراکتور ۲۸۵ با دقت $\pm 25 \text{ mm}$ بهره برده شد. (Aghkhani & Abbaspour-Fard, 2009). این پژوهش روی تراکتور و به کمک حسگرهای مکانیکی تماسی انجام پذیرفت. همچنین در تحقیقی دیگر با طراحی سامانه‌ای برای هدایت خودکار ماشین‌های کشاورزی در خصوص دقت الگوریتم پردازش تصویر دریافتند که نوع عملیات خاک‌ورزی روی زمین زراعی، تابش خورشید، و بقایای گیاهی اثری بر دقت تشخیص ندارد (Kiyani, 2009). در تحقیقی دیگر گروهی از پژوهشگران سامانه‌ای ارائه دادند که این سامانه به عنوان مارکری برای هدایت تراکتور در عملیات سم‌پاشی مزرعه استفاده شد. برای طراحی سامانه راهنما، از گیرنده GPS استفاده شد. در این



شکل ۲۰. خروجی تبدیل هاف، فاصله (ρ) و زاویه (θ) خط مورد نظر به ازای هر خط در مختصات دکارتی

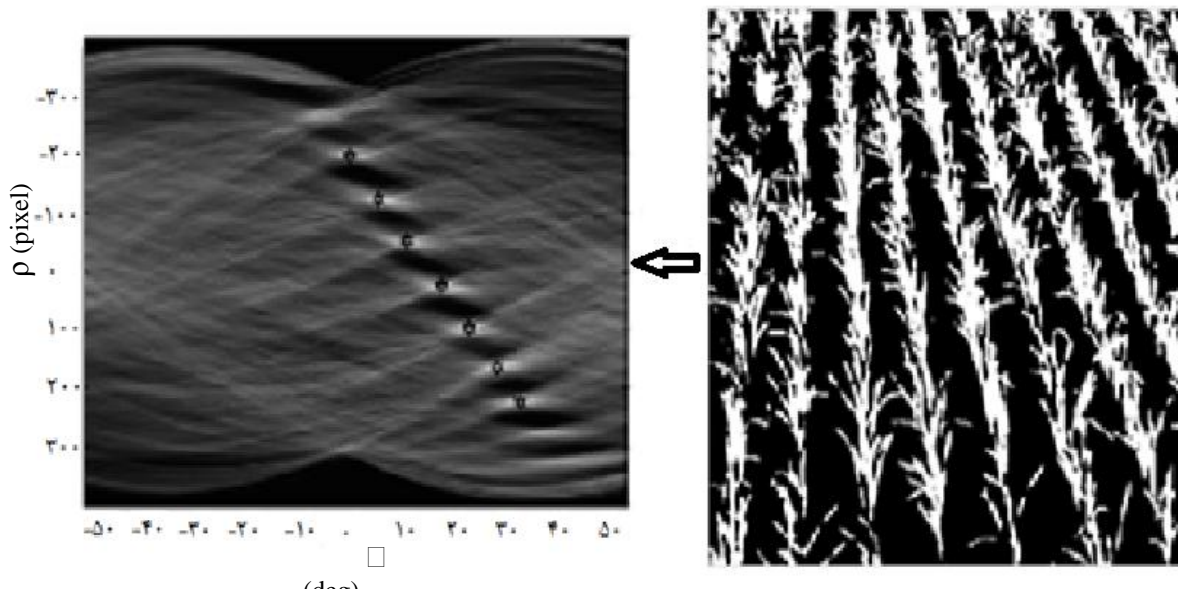
قطبی (ρ, θ) است و همچنین باید توجه داشت که منحنی‌های سینوسی تمام نقاط واقع بر یک خط در فضای دکارتی همگی در یک نقطه با چگالی بیشتر (شدت روشنایی بیشتر) در فضای قطبی مشترک هستند. این مطلب در شکل ۳ قابل مشاهده است. در این تصویر مبنای اندازه‌گیری زاویه θ ، محور افقی بالای تصویر و مبنای اندازه‌گیری شعاع ρ ، نقطه میانی این محور است، از این رو در این شکل نقطه مبنای مختصات قطبی نقطه میانی محور افقی بالای تصویر قرار داده شده است. در شکل (۳) تصویر سمت چپ حاصل اعمال تابع تبدیل بر تصویر سمت راست تصویر است.

از آنجاکه در تبدیل هاف خطوط با مختصات قطبی نمایش داده می‌شوند، بنابراین می‌توان معادله خط را با رابطه‌های ۱ و ۲ بازنویسی کرد:

$$y = \left(-\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right)x + \left(\frac{\rho}{\sin \theta}\right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (\text{رابطه ۲})$$

با توجه به روابط ۱ و ۲، نمایش یک نقطه در فضای قطبی (ρ, θ) معادل یک خط در فضای دکارتی و نمایش یک نقطه در فضای دکارتی معادل یک منحنی سینوسی در فضای



شکل ۲۰. نمودار سمت چپ مربوط به خروجی تبدیل هاف اعمال شده بر تصویر سمت راست

نقاط بیشتر به نظر می‌رسد، مختصات همان خطی است که تمام نقاط روی آن خط بر این نقطه تصویر شده است. با دقت در شکل ۳ مشخص است که به تعداد خطوط کامل کشت در

تبدیل هاف باعث می‌شود تا مختصات نقاطی که روی یک خط راست قرار دارند در یک نقطه تصویر شوند. بنابراین مقدار روشنایی آن نقطه از تصویر خروجی تبدیل که در مقایسه با بقیه

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از ماشین‌بینایی به‌عنوان حسگر مدنظر برای نصب روی کمباین به‌منظور تشخیص انحراف کمباین از مسیر معیار انتخاب شد. به این منظور از دوربین آنالوگ مدل-EVE 717SN محصول شرکت Eye Vision استفاده شد. این دوربین با بهره‌گیری از حسگر CCD^۲ ۰/۳۳^۳ اینچ محصول شرکت سونی قادر به برداشت تصویر باکیفیت^۴ ۵۲۰TVL است. سیگنال خروجی این دوربین^۵ PAL است که نیاز به واسطه برای دیجیتالی‌کردن سیگنال دارد. مطابق شکل ۴ دوربین با هدف داشتن تصویر و میدان دید^۶ مناسب، روی پایه مخصوص خود با زاویه ۴۰ درجه زیرخط افق در جلوی کمباین و ارتفاعی هم‌سطح با کف اتاقک راننده نصب شد.

در این پژوهش از نرم‌افزار متلب^۶ برای اخذ تصویر از دوربین و پیاده‌سازی الگوریتم پردازش تصویر استفاده شد. مسیر پیشروی خطی ترسیم‌شده روی زمین با اختلاف رنگ اندک در مقایسه با زمینه خود در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که اساس تشخیص هرگونه خط و مسیر پیشروی تطابق بسیاری با الگوریتم ارائه‌شده دارد و فقط در نوع صافی‌های اولیه و مقادیر آستانه تفاوت خواهد داشت؛ بنابراین با اندکی تغییر می‌توان از این الگوریتم برای تشخیص لبه^۷ محصول برداشت‌شده و یا خط سفیدرنگ حاشیه جاده استفاده کرد. نمونه‌هایی از استخراج ردیف‌های کشت محصول به‌وسیله الگوریتم پیشنهادی در شکل ۵ قابل مشاهده است. شایان ذکر است که تصاویر به‌گونه‌ای انتخاب شد تا کارایی سامانه در استخراج ردیف از مزارع پوشیده و متراکم (تصویر سمت چپ) و مزارع با تغییر رنگ شدید زمینه (تصویر سمت راست) بررسی شود.

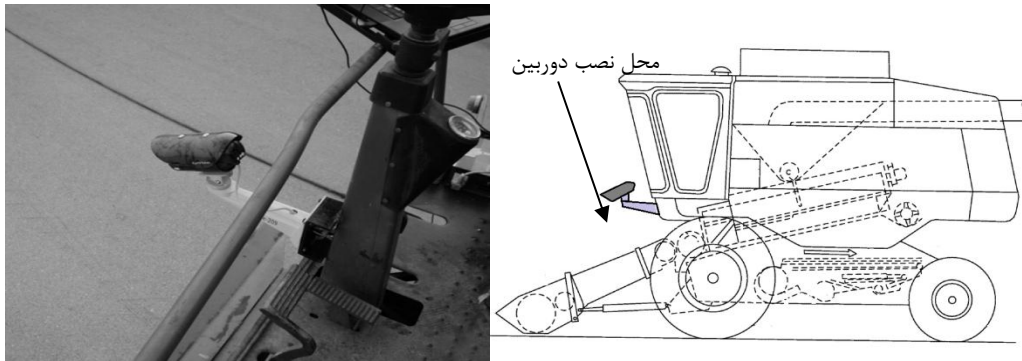
پس از پاک‌کردن حافظه (به‌منظور جلوگیری از بروز خطای احتمالی و ایجاد اختلال در برنامه پردازشی) و فراخوانی تصویر دوربین و همچنین اجرای پیش‌نمایش، سامانه آماده پردازش تصویر برای استخراج ویژگی‌های آن می‌شود. پس از آزمایش عکس‌های نمونه، مشخص شد که اعمال صافی لبه‌یابی سوبل در زاویه ۹۰ درجه تصویر خاکستری شده است، در آماده‌سازی عکس گرفته‌شده و پیش‌پردازش آن بسیار مفید است (شکل ۶).

تصویر سمت راست، نقاط با روشنایی بسیار بالا در تصویر سمت چپ مشاهده می‌شود (هفت نقطه روشن علامت‌گذاری شده در تصویر سمت چپ دیده می‌شود و همچنین ردیف‌های کامل درون تصویر سمت راست نیز هفت ردیف است. سایر ردیف‌های ناقص درون تصویر به‌وسیله نقاط با روشنایی کمتر مشخص می‌شود). محور عمودی، فاصله از مبدأ تصویر p و محور افقی آن زاویه θ است. با داشتن این مقادیر و انجام محاسبات، می‌توان مختصات نقاط تشکیل‌دهنده خطوط را پیدا کرد و روی شکل اصلی رسم کرد.

از میان این دو روش، به‌طورکلی روش تعیین خطوط موازی سرعت پاسخ کمتری در مقایسه با روش تبدیل هاف دارد. لازم به ذکر است در صورت بالابودن حجم تصاویر، پردازش لازم برای تبدیل هاف بسیار بیشتر و سرعت پاسخ کمتری در مقایسه با روش خطوط موازی خواهد داشت. بنابراین تبدیل هاف برای به‌کارگیری در سامانه‌های کنترل لحظه‌ای مناسب نیست. با توجه به ویژگی‌های ساختاری، نیاز به سرعت پاسخ بالا و دقت عمل لازم در این پژوهش از تبدیل هاف به‌منظور استخراج مختصات مسیر پیشروی استفاده شد. به‌منظور آماده‌سازی تصویر اولیه و کاهش زمان پردازش با تبدیل هاف در اغلب الگوریتم‌های پردازشی از صافی‌ها و بهینه‌سازهای تصویر استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز از بهینه‌سازهای متنوع که مهم‌ترین آن‌ها صافی سوبل^۱ است، استفاده شد. این صافی به تغییرات شدت رنگ پیکسل‌ها در تصویر حساس است و با مشتق‌گیری از تغییرات شدت رنگ، قسمت‌هایی از تصویر را که شبیهی در اعداد پیکسل‌ها وجود داشته باشد به‌عنوان لبه انتخاب می‌کند. براساس نیاز الگوریتم می‌توان، حساسیت صافی را به لبه‌های افقی، عمودی، و یا لبه‌های با شیب مشخص تقویت کرد. فاصله جانبی مرکز کمباین از مسیر مورد نظر (انحراف جانبی) و انحراف زاویه‌ای در مقایسه با مسیر پیشروی، مؤلفه‌های کنترلی لازم سامانه هدایت خودکار کمباین هستند. این پژوهش با هدف طراحی الگوریتم ماشین‌بینایی به‌منظور اخذ تصویر از دوربین نصب‌شده در جلوی اتاقک کمباین JD955 و استخراج خط ترسیم‌شده به‌عنوان مسیر پیشروی انجام پذیرفت. با استخراج مشخصات مسیر پیشروی و تعیین انحراف‌های جانبی و زاویه‌ای، زمینه لازم برای به‌کارگیری این سامانه به‌عنوان حسگر تشخیص مسیر سامانه هدایت خودکار کمباین فراهم می‌شود.

2. Charge-coupled device
3. TV Lines
4. Phase Alternating Line
5. Field of view
6. MATLAB

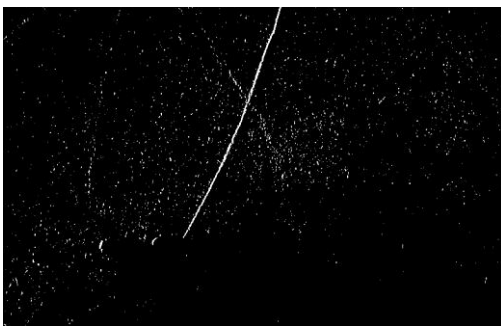
1. Sobel



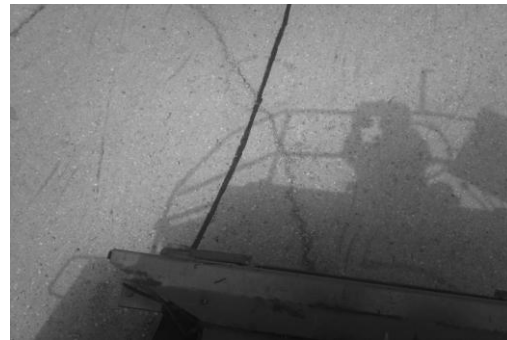
شکل ۴. دوربین نصب شده روی کمباین به منظور تصویربرداری از مسیر پیشروی



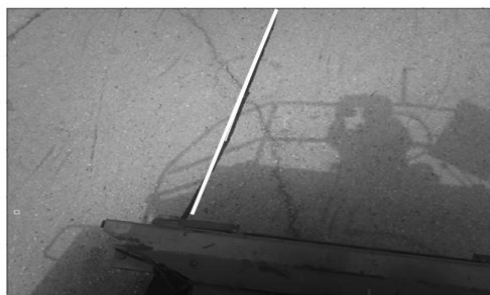
شکل ۵. نمونه‌هایی از استخراج ردیف‌های کشت محصول به وسیله الگوریتم پیشنهادی



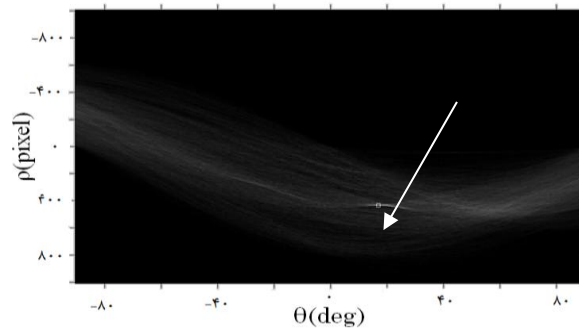
(ب)



(الف)

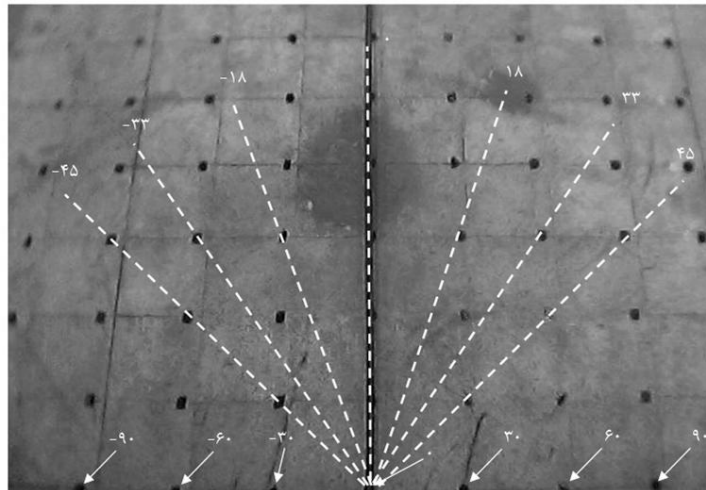


(د)



(ج)

شکل ۶. الف) تصویر برداشت شده از مسیر پیشروی، ب) اعمال صافی سو بل بر تصویر و حذف خطوط و سایه‌های تصویر، ج) اعمال تبدیل هاف روی تصویر و موقعیت نقطه پیشینه، و د) استخراج خط نهایی از تصویر به عنوان مسیر پیشروی



شکل ۷. سطوح تیمارهای انحراف جانبی و انحراف زاویه‌ای در تعیین دقت الگوریتم پردازش تصویر پیشنهادی

شود. از این رو با محاسبه اختلاف فاصله عرضی اندازه‌گیری شده به وسیله الگوریتم با فاصله اندازه‌گیری شده به روش دستی (به کمک متر نواری با دقت میلی‌متر)، دقت الگوریتم در تعیین انحراف جانبی کمباین از مسیر پیشروی تعیین می‌شود. کمیت‌های انحراف جانبی (D) و انحراف زاویه‌ای (T) در شکل ۷ قابل مشاهده هستند.

همان‌طور که در شکل ۷ قابل مشاهده است، الگوریتم توانایی اندازه‌گیری انحراف جانبی در بازه [۱۱۰ -۱۱۰] سانتی‌متر را دارد. به منظور بررسی دقت اندازه‌گیری انحراف جانبی در تمام عرض تصویر، این عامل در هفت تیمار از نظر فاصله عرضی (شامل فواصل ۹۰، ۶۰، ۳۰، ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰- سانتی‌متر) و هفت تکرار ارزیابی شد که نتایج تجزیه واریانس آن را می‌توان در جدول ۱ می‌توان مشاهده کرد. در برداشت محصول با کمباین، هدایت کمباین تا لبه برداشت شده محصول و یا ردیف کاشت مورد نظر به عهده راننده است و پس از آن سامانه هدایت خودکار، کنترل کمباین را به عهده می‌گیرد. همان‌طور که اشاره شد وظیفه این سامانه تشخیص انحراف جانبی نقطه‌ای مشخص از تیغه برش با لبه برداشت شده محصول است و بنابراین نیازی به پوشش تصویری کامل عرض برش نخواهد داشت. از سویی بیشینه انحراف جانبی در هدایت به وسیله سامانه کمتر از ۱۰ سانتی‌متر گزارش شد؛ بنابراین بازه [۱۱۰ -۱۱۰] فقط به دلیل اطمینان از کارکرد صحیح و البته پوشش دادن تصویر در لحظه شروع به کار سامانه (پیش از رسیدن با پایداری) در نظر گرفته شد درحالی‌که بازه‌های محدودتر نیز پاسخگوی نیاز سامانه خواهد بود.

نتایج و بحث

با ارزیابی سامانه در تشخیص خطوط تصویر و ردیف‌های کشت در شرایط متفاوت و پردازش بیش از ۴۰۰ نمونه تصویر با

در این الگوریتم با توجه به لزوم بی‌درنگ بودن عملیات هدایت خودکار، از مهم‌ترین نکات در انتخاب دستورها و حجم عملیات، زمان لازم پردازش است؛ بنابراین سعی شده است تا با انجام کمترین پردازش و در کوتاه‌ترین زمان مسیر پیشروی به صورت دقیق و مطمئن استخراج شود. لبه‌یابی^۲ موجب می‌شود می‌شود تا بسیاری از خطوط و لبه‌های افقی موجود در تصویر که می‌توانند باعث ایجاد خطا در تشخیص مسیر شوند، حذف گردند. به کمک تکنیک آستانه‌گذاری روی تصویر حاصل از صافی سوبل و سپس تبدیل آن به تصویر باینری، بسیاری از نقاط موجود در تصویر حذف شد. این عمل تأثیر زیادی در کاهش زمان پردازش به کمک تبدیل هاف و همچنین زمان تشخیص صحیح مسیر دارد. با اعمال تبدیل هاف روی تصویر حاصل از آستانه‌گذاری، استخراج خط میسر شد. واضح است که با توجه به اصول تبدیل هاف، مختصات نخستین و قوی‌ترین نقطه بیشینه^۳ حاصل از این تبدیل که بیشترین شدت روشنایی را به خود اختصاص داده باشد در حقیقت مختصات تبدیل یافته خط یا همان مسیر پیشروی کمباین خواهد بود. با استخراج خط و به دست آوردن مختصات دکارتی آن عملاً الگوریتم وظیفه خود را انجام داده است و می‌توان ورودی‌های سامانه هدایت خودکار کمباین یعنی انحراف جانبی و انحراف زاویه‌ای خط در مقایسه با وسط تصویر به دست آمده را تعیین کرد.

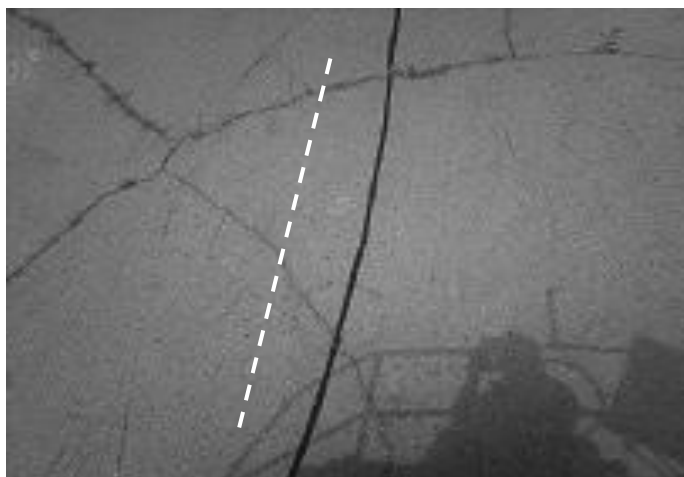
روش ارزیابی دقت سامانه

پس از آنکه الگوریتم موفق به تشخیص صحیح خط شد می‌بایست دقت الگوریتم در تعیین مقدار دقیق انحراف بررسی

1. real-time
2. Edge detection
3. Hough peak

نمونه‌ای است از شرایطی که باوجود سایه کمباین و همچنین ترک‌ها و خطوط ناخواسته بر زمین، سامانه موفق به تشخیص صحیح خط شده است.

الگوریتم پیشنهادی، مشخص شد که سامانه در بیش از ۹۸ درصد موارد موفق به تشخیص صحیح مسیر پیشروی شده است (در بیش از ۹۸ درصد موارد از ۴۰۰ تصویر نمونه، سامانه قادر به تشخیص صحیح خطوط مورد نظر بوده است). شکل ۸



شکل ۸. تشخیص صحیح مسیر پیشروی باوجود سایه کمباین و خطوط ناخواسته در تصویر و خط استخراج شده پس از پردازش به‌عنوان مسیر پیشروی

دقت الگوریتم در تشخیص انحراف جانبی و زاویه‌ای

با توجه به مقادیر جدول ۱ می‌توان دریافت که اثر تیمار فاصله عرضی (D) بر دقت اندازه‌گیری معنی‌دار نیست. به‌عبارت‌دیگر، اختلاف در دقت اندازه‌گیری انحراف جانبی در نقاط گوناگون تصویر اتفاقی است و الگوریتم در تمام عرض تصویر، خط را با دقتی تقریباً یکسان تشخیص می‌دهد. میانگین کل خطا در اندازه‌گیری انحراف جانبی ۰/۹ cm و بیشینه خطا در تشخیص فاصله ۲/۴ cm است. ضریب تغییرات آزمون مذکور ۲۶ به‌دست آمد.

به‌منظور بررسی دقت الگوریتم در اندازه‌گیری انحراف زاویه‌ای (T) در حالات گوناگون قرارگیری خط از نظر فاصله عرضی و زاویه، این فاکتور در هفت فاصله عرضی متفاوت، هفت زاویه متفاوت، و سه تکرار ارزیابی شد. مقادیر عددی تیمارهای فاصله و زاویه در شکل ۷ مشاهده می‌شوند.

جدول ۱. نتایج حاصل از تجزیه واریانس خطا در تشخیص انحراف جانبی تحت تیمار فاصله عرضی

منابع متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
فاصله عرضی	۶	۵/۴۲	۰/۹۰۴ ^{ns}
خطا	۳۶	۲/۴۵	۰/۰۶۸
جمع	۴۲	۷/۸۷	

^{ns}: عدم معنی‌داری

جدول ۲. نتایج حاصل از تجزیه واریانس خطا در تشخیص انحراف زاویه‌ای تحت تیمارهای گوناگون

منابع متغیر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات
فاصله عرضی	۶	۵۷/۸۷	۹/۶۴۶**
زاویه خط	۶	۱۷/۴۹	۲/۹۱۶**
زاویه خط × فاصله عرضی	۳۶	۱۶۷/۰۷	۴/۶۴۱**
خطا	۹۸	۲۲/۶۷	۰/۲۳۱
جمع	۱۴۶	۲۶۵/۱۲	

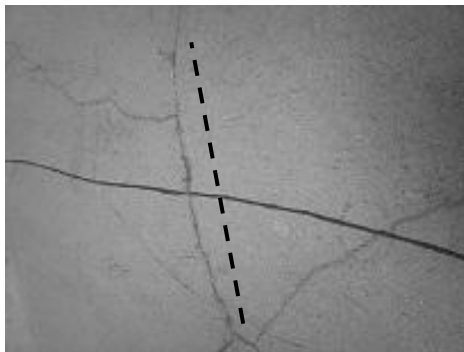
** : معنی‌داری در سطح ۱ درصد

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، اثر متقابل زاویه خط و فاصله عرضی معنی‌دار شده است؛ بنابراین با صرف‌نظر از بررسی تأثیرات اصلی این متغیرها و به‌کمک نمودار تأثیرات متقابل تیمارها که در شکل ۹ مشاهده می‌شود به بررسی نتایج حاصل از نمودار تأثیرات متقابل پرداخته می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود درباره تیمارهای زاویه ۰، ۱۸+ و ۱۸- درجه، میانگین تمامی تیمارها کمتر از دو درجه خطا را نشان می‌دهد، این موضوع در تمام فواصل عرضی برای این تیمارها صادق است. حتی این خطا درباره تیمار صفر درجه به کمتر از یک درجه اختلاف بین مقدار

حالت، الگوریتم در تشخیص صحیح مسیر پیشروی دچار مشکل می‌شود. در اولین حالت، به‌علت تابش آفتاب از پشت و زاویه تمایل زیاد آفتاب (مشابه با تابش در صبح یا بعدازظهر) در وضعیتی که سایه کمباین در تصویر است و همچنین اختلاف رنگ سایه و روشن بیشتر از اختلاف رنگ خط و زمینه باشد، الگوریتم مرز سایه و روشن را به‌عنوان مسیر می‌شناسد و در واقع دچار اشتباه می‌شود (شکل ۱۰-الف).

دومین وضعیتی که در آن الگوریتم در تشخیص صحیح خط دچار اشتباه می‌شود، وضعیتی است که در آن خط از پیش تعریف‌شده در مقایسه با کمباین زاویه‌ای بیش از ۴۵ درجه داشته باشد. در این وضعیت به‌علت استفاده از فیلتر سوبل ۹۰ درجه در پیش‌پردازش الگوریتم، خطوط افقی تصویر بسیار کم‌اثر می‌شود و در چنین وضعیتی اگر خط و یا سایه‌ای با زاویه کمتر از ۴۵ درجه به‌صورت ناخواسته در تصویر قرار گیرد، الگوریتم آن را به‌عنوان مسیر پیشروی تشخیص می‌دهد (شکل ۱۰-ب). شایان ذکر است که در هنگام هدایت کمباین در مزرعه، انحراف زاویه‌ای در بحرانی‌ترین حالت از ۲۰ درجه تجاوز نمی‌کند و در عمل هیچ‌گاه کمباین در مزرعه با وضعیتی مشابه با آنچه توصیف شد مواجه نمی‌شود. بنابراین بررسی این وضعیت فقط به‌منظور ارزیابی توانایی الگوریتم در تشخیص صحیح مسیر در حالات گوناگون صورت گرفت.

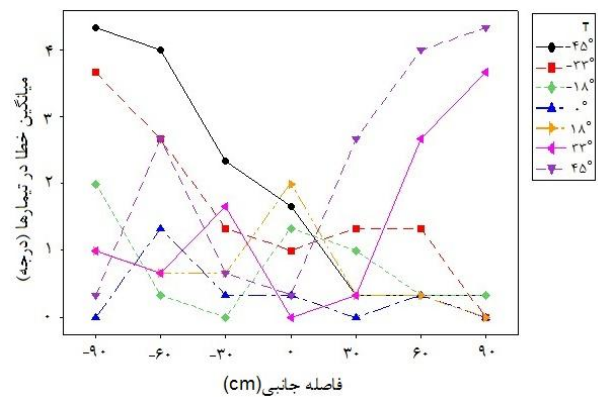


(ب)

شکل ۱۰. الف) تشخیص نادرست مسیر به‌علت تابش از پشت و اختلاف رنگ کم مسیر اصلی با زمینه، ب) تشخیص نادرست مسیر به‌علت زاویه‌ای بیش از ۴۵ درجه خط مورد نظر در تصویر

مسیر مورد نظر به‌عنوان مؤلفه‌های کنترلی لازم سامانه هدایت خودکار از تصویر استخراج شدند. پس از ارزیابی الگوریتم تشخیص مسیر مشخص شد این الگوریتم در ۹۸ درصد موارد توانسته است به‌درستی مسیر پیشروی را تشخیص دهد. با بررسی دقت الگوریتم تشخیص مسیر در تعیین انحراف جانبی مشخص شد. این سامانه در تمام مراحل کار خود مسیر را با میانگین خطای ۰/۹ سانتی‌متر و حداکثر خطای ۲/۴ سانتی‌متر

واقعی و مقدار اندازه‌گیری‌شده به‌وسیله الگوریتم در میانگین تکرارهای آن می‌رسد. با توجه به مطالب فوق می‌توان نتیجه گرفت، هنگامی که طول کمی از خط در تصویر قرار می‌گیرد، دقت الگوریتم در تعیین انحراف زاویه‌ای کاهش می‌یابد. از آنجاکه هنگام هدایت کمباین عموماً انحراف زاویه‌ای کمتر از ۲۰ درجه است، بنابراین می‌توان گفت خطای الگوریتم در اندازه‌گیری انحراف زاویه‌ای در محدوده کاری کمباین کمتر از دو درجه است.



شکل ۹. نمودار تأثیرات متقابل خطای اندازه‌گیری زاویه در تیمارهای زاویه و فاصله عرضی

پس از ارزیابی الگوریتم در تشخیص صحیح مسیر با برداشت و پردازش تصاویر گوناگون مشخص شد که فقط در دو



(الف)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش پس از طراحی الگوریتم ماشین بینایی با هدف برداشت تصویر از دوربین نصب‌شده در جلوی کابین کمباین JD955 و استخراج خط ترسیم‌شده به‌عنوان مسیر پیشروی اقدام به ارزیابی این الگوریتم که بخش اصلی سامانه مسیریابی کمباین است، گردید. فاصله عرضی مرکز کمباین از مسیر مورد نظر (انحراف جانبی کمباین) و انحراف زاویه‌ای در مقایسه با

پیشروی در محدوده کاری کمابین در مزرعه (± 18 درجه) سامانه مسیر را با خطای کمتر از دو درجه تشخیص داده است.

تشخیص داده است. همچنین بررسی‌های آماری نتایج آزمایش نشان داد که در اندازه‌گیری انحراف زاویه‌ای در مقایسه با مسیر

REFERENCES

- Aghkhani, M.H. & Abbaspour-Fard, M.H. (2009). Automatic off-road vehicle steering system with a surface-laid cable: Concept and preliminary tests. *Biosystems Engineering*, 103, 265-270.
- Bandei, M. & Minaei, S. (2005). Using of GPS for tractor navigation system. 4th National Congress on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. In: 12-14 Sept. University of Tabriz, Iran. (In Farsi)
- Barawid, O.C., Mizushima, A., Ishii, K. & Noguchi, N. (2007). Development of an Autonomous Navigation System using a Two-dimensional Laser Scanner in an Orchard Application. *Biosystems Engineering*, 96 (2), 139-149.
- Benson, E. R., Reid, J. F. & Zhang, Q. (2001). Machine-vision-based steering system for agricultural combines. ASAE meeting presentation, paper No. 01-1159.
- Gee, Ch., J. Bossu, G. Jones & F. Truchetet. (2008). Crop weed discrimination in perspective agronomic images, *Computers and Electronics in Agriculture*, 60, 49-59.
- Kiyani, S. (2009). Development and Evaluation of a Guidance-Assistant System for Agricultural Vehicles in Tillage. Msc thesis, University of Shiraz, Shiraz, Iran. (In Farsi)
- Sabelhaus, D., Roßben, F., Helliger, L.P. & Lammers P.S. (2013). Using continuous-curvature paths to generate feasible headland turn manoeuvres. *Biosystems Engineering*, 116, 399-409.
- Søgaard, H.T. & Olsen H.J. (2003). Determination of crop rows by image analysis without segmentation, *Computers and Electronics in Agriculture*, 38: 141-158.
- Stoll, A. & Heinz, D.K. (2000). Guidance of a Forage Harvester with GPS. Institute for Agricultural Engineering, Hohenheim University, 70599 Stuttgart, Germany.
- Tian, L., J.F Reid & J.W. Hummel. (1999). Development of a precision sprayer for site-specific weed management. *Transactions of the ASABE*, Vol. 42(4) 893-900. St Joseph, MI: ASABE.
- Yin, X., Noguchi, N. & Choi, J. (2013). Development of a target recognition and following system for a field robot. *Computers and Electronics in Agriculture*, 98, 17-24.