

ارائه یک الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده برای پیکربندی بهینه مزارع مسطح جهت استفاده در سامانه‌های طراحی مسیر وسایل نقلیه کشاورزی

رحمان گودرزی¹ - حسن صدرنیا^{2*} - عباس روحانی³ - مصطفی نوری بایگی⁴

تاریخ دریافت: 1395/06/03

تاریخ پذیرش: 1396/02/23

چکیده

در سال‌های اخیر، عرضه ربات‌های سیار و ماشین‌های مجهز به سامانه‌های هدایت خودکار برای کار در محیط‌های کشاورزی افزایش یافته است. طراحی مسیر برای این سامانه‌ها یک ضرورت است و همچنین یک فرصت جدید برای بهبود بازدهی عملیات زراعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فراهم آورده است. تاکنون راهکارهای زیادی برای برآورده کردن احتیاجات خاص مسئله طراحی مسیر در محیط کشاورزی ارائه شده‌اند. بخش مهم این راهکارها وجود یک توصیف بهینه و سریع از محیط عملیات به‌عنوان یک نقشه مبنا است. در این پژوهش، یک الگوریتم تجزیه برای پیکربندی چندضلعی بیان‌گر محیط عملیات زراعی با ارتقاء روش تجزیه سلولی بوستروفدون در رباتیک ارائه شده است. الگوریتم با ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌ساز برای کاهش هزینه با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگامی طراحی شد و روی مجموعه‌ای از نمونه‌ها (شامل 18 مورد چند ضلعی‌های ساده تا پیچیده) اعمال گردید. سپس با مقایسه آن با حالت عدم تجزیه و روش تجزیه - ادغام به‌عنوان یکی از سریع‌ترین روش‌ها ارزیابی شد. الگوریتم در زمان پردازش بسیار اندک (زیر 100 میلی‌ثانیه) و ده‌ها برابر سریع‌تر از روش تجزیه - ادغام نتایج بهینه، به‌ویژه در محیط‌های پیچیده ارائه کرده است. نتایج، به‌طور متوسط دو درصد کاهش هزینه را نسبت به حالت عدم تجزیه و روش تجزیه - ادغام نشان می‌دهد و گستره آن از 8- تا 14 درصد نسبت به حالت عدم تجزیه و تا 12 درصد نسبت به روش تجزیه - ادغام است. دیگر مزایای الگوریتم، دستیابی به پوشش کامل و سازگاری با انواع شکل مزرعه و ماشین‌های زراعی است.

واژه‌های کلیدی: پیکربندی مزرعه، تجزیه بوستروفدون، طراحی مسیر، مزارع مسطح، وسایل نقلیه کشاورزی

مقدمه

سیار وجود دارد. به‌عنوان یک نتیجه باید گفت طراحی مسیر⁵ بهینه فرصت‌های جدیدی را برای بهبود عملیات زراعی و کاهش اثرات زیست‌محیطی فراهم آورده است.

طراحی مسیر در حوزه رباتیک به‌طور گسترده مطالعه شده است، اما راهکارهای این حوزه به‌طور مستقیم در محیط‌های کشاورزی قابل استفاده نیستند (Bochtis et al., 2007; Hameed et al., 2010; Driscoll, 2011). دلیل آن را می‌توان ناشی از ماهیت عملیات زراعی و تفاوت‌های ذاتی ماشین‌های مورد استفاده در این دو محیط دانست: ماشین‌های زراعی غیر هولونومیک⁶ هستند، هم‌چنین آن‌ها قادر به اجرای عملیات زراعی حین انجام مانورها نیستند. از طرف دیگر دستیابی به پوشش کامل سطح مزرعه در عملیات زراعی یک

در سال‌های اخیر عرضه ربات‌های سیار و ماشین‌های مجهز به سامانه‌های هدایت خودکار برای کار در محیط‌های کشاورزی افزایش یافته است. برنامه‌ریزی حرکت و طراحی یک مسیر از لحظه آغاز تا پایان عملیات برای این سامانه‌های سیار ضروری است. از طرفی با وجود این سامانه‌ها، همچنان راهبرد پوشش مزرعه به تجربه و دانش عمومی انسان وابسته است و الگوهای پوشش کنونی به‌ویژه در محیط‌های پیچیده بهینه نیستند، بنابراین با تعبیه فرآیندهای جستجو و ارائه مسیرهای بهینه، امکان بهره بردن از مزایای این سامانه‌های

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیزاسیون کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

2- دانشیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

3- استادیار، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

4- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

*- نویسنده مسئول: (Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)

DOI: 10.22067/jam.v8i2.58398

5- Path planning

6- یک سامانه هولونومیک (Holonomic system) قادر به تغییر مسیر با چرخش حول محور مرکزی خود است در حالی که سامانه‌های غیر هولونومیک باید مانورهای دور زدن را اجرا کنند؛ این ویژگی، محدودیت‌های سینماتیکی و دینامیکی را به مسئله اضافه می‌کند و شرایط مسئله پیچیده‌تر می‌شود.

طراحی مسیر برای واحدهای پشتیبان در عملیات برداشت (Jensen *et al.*, 2012) یا پیمایش بهینه پشته‌ها و ارائه الگوهای کاری جدید (و منحصر به شرایط هر مزرعه و عملیات) تحت عنوان الگوهای B¹⁰ (Bochtis *et al.*, 2013) و یا تردد بهینه بین قطعات حاصل از تجزیه در محیط‌های دارای مانع (Hameed *et al.*, 2013; Zhou *et al.*, 2014) اشاره کرد.

مسیریابی واحد(های) سیار شرکت‌کننده در عملیات زراعی شباهت بسیار زیادی به "مسئله مسیریابی وسیله نقلیه"¹¹ در مباحث لجستیک دارد. از این رو تاکنون پژوهش‌های زیادی به صورت بسط مفهومی و نظری و شبیه‌سازی از چند مسئله شناخته شده در این حوزه ارائه شده است. در همین راستا می‌توان به توسعه نظری "مسئله مسیریابی وسیله نقلیه" برای واحدهای اصلی و پشتیبان (Bochtis and Sørensen, 2009; Bochtis and Sørensen, 2010) و بهینه‌سازی در - لحظه¹² برای مسیریابی پوششی مزرعه (Edwards and Jensen, 2013) اشاره کرد.¹³ در مطالعه دیگری، Ali *et al.*, 2009 "مسئله جریان شبکه با کم‌ترین هزینه"¹⁴ را برای لجستیک زراعی در عملیات برداشت شبیه‌سازی کردند. پیش از این اثبات شده است که مسئله طراحی مسیر پوششی NP-hard است (Choset, 2001) و امکان دستیابی به حل بهینه و دقیق آن در ابعاد واقعی مسئله وجود ندارد و از سوی دیگر افزودن احتیاجات طراحی مسیر در محیط کشاورزی شرایط حل مسئله را پیچیده‌تر می‌کند. این احتیاجات عبارتند از:

استفاده از مسیرهای مستقیم یا منحنی نرم (در تناسب با ماشین‌های مجهز به سامانه‌های هدایت و امکان کاهش هم‌پوشانی) کاهش هزینه ضمن پوشش کامل سطح مزرعه تولید قطعات عملیات‌پذیر (تعدادی زیر ناحیه نسبتاً بزرگ و بدون مانع در صورت لزوم تجزیه سطح عملیات) حداقل زمان پردازش (حداقل زمان محاسباتی به‌دلیل مصارف آنالین و شرایط ضرورت باز- طراحی عملیات) عمده این احتیاجات در توان راهکارهای پیکربندی مکانی و به‌طور مشخص روش‌های تجزیه سطح عملیات است و تاکنون

ضرورت و در محیط‌های پیچیده یک چالش است. به‌علاوه بعضی عملیات زراعی با مشارکت گروهی از ماشین‌های اصلی¹ و پشتیبان² اجرا می‌شوند (مانند عملیات برداشت). در این شرایط، محدودیت ظرفیت³ ماشین‌ها و بعضاً ناهمسان بودن⁴ گروه ماشین‌ها از لحاظ ویژگی‌های عملیاتی، طراحی مسیر را پیچیده‌تر می‌کند.

راهکارهای طراحی مسیر در محیط‌های کشاورزی شامل دو مرحله اصلی "پیکربندی مکانی"⁵ و "مسیریابی" و وسایل نقلیه کشاورزی⁶ می‌باشد (Bochtis *et al.*, 2014). در "پیکربندی مکانی" عناصر مکانی محیط عملیات زراعی، تولید و توصیف می‌شوند.⁸ توصیف به‌دست آمده سپس در مرحله "مسیریابی" به یک گراف متناظر آن تبدیل می‌شود. رأس‌های این گراف می‌تواند متناظر با عناصر مکانی محیط انجام عملیات مانند مزرعه‌ها، قطعات حاصل از تجزیه سطح، نوارهای کاری⁹ و دیگر موارد باشد. هم‌چنین این گراف می‌تواند به‌عنوان یک محیط جستجو، موقعیت مکانی واحدهای سیار مانند نقاط آغازین، پایانی و لحظه‌ای آن‌ها، هم‌چنین اطلاعاتی مانند وضعیت مسیرها را نگه‌داری کند. بنابراین با اعمال الگوریتم‌های جستجو روی این گراف، امکان ارائه یک مسیر دسترسی بهینه بین دو موقعیت مکانی، مربوط به واحدهای سیار و یا تعیین تردد بهینه بین عناصر مکانی محیط عملیات وجود دارد. برای نمونه می‌توان به

1- Primary unit(s)

2- Service unit(s)

3- بعضی عملیات زراعی همچون عملیات برداشت یا کاشت و مانند آن دارای یک جریان مواد (Material flow) به درون یا بیرون مزرعه است که به آن‌ها عملیات ظرفیتی (Capacitated operations) گفته می‌شود. در مقابل، عملیات غیرظرفیتی (Non-capacitated operations) به عملیاتی مانند خاک‌ورزی و برش علفه و دیگر موارد مشابه گفته می‌شود که در آن هیچ حالتی از انتقال مواد به درون یا بیرون از مزرعه وجود ندارد. عملیات ظرفیتی با حضور یک گروه از ماشین‌های اصلی (برای انجام عملیات) و تعدادی ماشین‌های پشتیبان (برای خدمت‌رسانی به ماشین‌های اصلی) انجام می‌شود (Bochtis and Sørensen, 2010). در این موارد، تعیین مکان‌های تخلیه و یا بارگیری در عملیات برداشت و یا شارژ مجدد مخزن بذر و سم در عملیات کاشت و داشت و تعیین محل‌های دسترسی به ماشین‌ها می‌تواند بر بازدهی کل عملیات اثر بگذارد، از این رو باید در امر طراحی مسیر مد نظر قرار بگیرد.

4- Non-identical (machines)

5- Spatial configuration

6- (Agricultural vehicles) rout planning

7- این تمایز بین راهکارهای طراحی مسیر در محیط‌های کشاورزی به آن‌چه در رباتیک با عنوان "توصیف" و "الگوریتم" به‌عنوان مؤلفه‌های طراحی مسیر وجود دارند، شباهت دارد؛ برای جزئیات بیشتر (Murphy, 2000) را ببینید.

8- فرآیندهای توصیف عناصر مکانی محیط عملیات در مطالعات شامل این موارد می‌شود: توصیف مزرعه‌ها، تجزیه سطح عملیات در محیط‌های پیچیده، تولید ناحیه سرگرم مزرعه، تولید نوارهای کاری و ساده‌سازی مرزهای مزرعه در جریان استخراج نقاط رأسی آن با استفاده از ماشین‌های مجهز به GPS.

9- Field-work tracks

10- B-patterns

11- VRP (Vehicle Routing Problem)

12- Real time

13- مسیریابی واحدهای اصلی و پشتیبان در دو مرحله انجام می‌گیرد: ابتدا مسیریابی پوششی کل مزرعه برای واحدهای اصلی تولید می‌شود، سپس با استفاده از نقشه پراکندگی محصول و یا داده‌های احتمالی و یا به‌دست آمده از حس‌گرها، موقعیت مکانی سرویس‌رسانی برای واحدهای اصلی تعیین می‌شود، در گام بعد با استفاده از موقعیت لحظه‌ای واحدهای پشتیبان، بهترین مسیر دسترسی به واحدهای اصلی به‌دست می‌آید.

14- MCNFP (Minimum Cost Network Flow Problem)

و بلادرنگ از محیط عملیات به عنوان نقشه مینا برای راهکارهای مسیریابی ارائه کردند. در این راهکار، یک توصیف بهینه مدنظر قرار نگرفته است و در محیط‌های پیچیده زمان محاسباتی قابل قبولی ندارد. در نهایت Driscoll (2011) یک الگوریتم چند مرحله‌ای برای ارتقاء دو الگوریتم ارائه شده به وسیله Oksanen و Visala (2009) و Jin و Tang (2010) پیشنهاد کرد. در این الگوریتم، ابتدا یک جهت بهینه اولیه تعیین می‌شود، سپس مزرعه، تنها یک بار با استفاده از تجزیه دوزنقه‌ای در این جهت تقسیم می‌شود و در ادامه، تنها یک بار و از یک سمت مزرعه، قطعات تولیدی ادغام شده و طی گام ادغام، کاهش هزینه پوشش بررسی می‌گردد. با توجه به اصلاحاتی که با هدف کاهش فضای جستجو در این الگوریتم انجام گرفته است، احتمال از دست رفتن جواب‌های بهینه وجود دارد. بر اساس آنچه گفته شد، ابزارهای تجزیه سلولی فضای آزاد، قابلیت زیادی برای حل مسئله طراحی مسیر پوششی در محیط کشاورزی دارند، با این حال بعضی از روش‌های ارائه شده با همه نوع شکل مزارع سازگاری نداشته و یا به دلیل بعضی پردازش‌های درونی زمان‌بر، در مسائل واقعی با اندازه بزرگ، کارایی (محاسباتی) ندارند.

هدف از این پژوهش ارائه یک روش تجزیه بهینه به عنوان بخش مهمی از واحد پیکربندی در سامانه‌های طراحی مسیر در محیط کشاورزی با در نظر گرفتن همه احتیاجات آن است. این روش، نسخه اصلاح شده یکی از ابزارهای قدرتمند و کارا از حوزه تجزیه سلولی در رباتیک تحت عنوان تجزیه بوستروفدون است، از این رو کاربرد آن محدود به فضاهای عملیاتی از پیش شناخته شده است که مرزهای محیط عملیات در آن‌ها با استفاده از چندضلعی توصیف شده باشد. با این حال، در صورت وجود محیط‌های توصیف شده با منحنی‌ها، امکان تقریب آن‌ها با یک توالی از پاره‌خط‌های مستقیم وجود دارد. به هر حال، در این جا فرض بر وجود آگاهی کافی از محیط عملیات زراعی پیش از اجرای عملیات است. برای دستیابی به یک حل بهینه در این پژوهش مفهوم برخورد و ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌ساز (با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی) و روش موازی‌سازی اضلاع چند ضلعی بیان‌گر مزرعه ارائه شده است.

مواد و روش‌ها

راهکار کاهش هزینه مبتنی بر مفهوم حداقل برخورد با اضلاع مزرعه

الگوهای کاری سرگاهی مزرعه به دلیل سادگی در اجرا و تناسب با سامانه‌های هدایت و ماشین‌های خود راهبر کشاورزی تقریباً در همه مطالعات طراحی مسیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند، از این رو مانند عمده تحقیقات در این زمینه، تأکید این پژوهش بر کاهش

تعدادی روش‌های اصلاح شده با منشأ رباتیک و تعدادی راهکار ابتکاری با هدف برآورده کردن این احتیاجات ارائه شده است. در همین راستا و در یکی از نخستین مطالعات Taïx و همکاران (2006) برای تضمین پوشش کامل سطح مزرعه، الگوریتم پردازش سلول‌های محدب را توسعه دادند. هم‌چنین Ryerson و Zhang (2005) توصیف مزرعه در قالب یک شبکه متشکل از سلول‌های مربعی شکل (گرید) امکان استفاده از الگوریتم ژنتیک را برای دستیابی به پوشش کامل (گذر از مرکز تمام سلول‌های گرید) بررسی کردند، با این حال تنها به پوشش حدود 90٪ دست یافتند. گروهی نیز استفاده از ابزارهای تجزیه سلولی فضای آزاد¹ را مد نظر قرار دادند. در همین راستا Oksanen و Visala (2009) و از تجزیه دوزنقه‌ای چندضلعی بیان‌گر مزرعه برای دستیابی به پوشش کامل و در ادامه آن، ادغام قطعات حاصل از تجزیه سطح مزرعه برای تولید نواحی بزرگ‌تر و کاهش هزینه پوشش استفاده کردند. در هر مرحله از پیشروی این الگوریتم، ابتدا یک جهت بهینه راندگی بر اساس یک الگوریتم ابتکاری تعیین و در این جهت، چندضلعی تجزیه می‌شود، سپس طی یک گام ادغام، بهترین بلوک (متشکل از یک یا چند قطعه) انتخاب و از ناحیه اصلی کنار گذاشته می‌شود. این مراحل تا پایان فرآیند تجزیه در ناحیه باقی‌مانده تکرار می‌شود. ادغام قطعات بر اساس یک تابع هزینه شامل جمع وزنی سه عامل مساحت ناحیه ادغام شده، مسافت پیموده شده و زمان دور زدن‌ها انجام می‌شود. در مطالعه دیگری، یک روش از حوزه تجزیه سلولی با هدف تولید تعدادی قطعات محدب شکل در طراحی مسیر برای عملیات زراعی توسعه داده شد (Hofstee et al., 2009). این روش تنها در مزارعی با یک تورفتگی کاربرد داشت. روش دیگری از حوزه تجزیه سلولی تحت عنوان تجزیه بوستروفدون برای دستیابی به پوشش کامل در محیط‌های پیچیده برای بالگردهای مورد استفاده در مزارع کشاورزی ارائه شد (Moon and Shim, 2009). هم‌چنین از این روش برای تولید تعدادی قطعات ساده و بدون مانع، استفاده شده است (Zhou et al., 2014). در مطالعه دیگری، راهکار متفاوتی با استفاده از راهبرد تجزیه و غلبه تحت عنوان "همه راه‌های تقسیم مزرعه به دو قطعه" بررسی شد (Jin and Tang, 2010). هدف از این روش، دستیابی به تجزیه بهینه سطح مزرعه و کاهش هزینه پوشش سطح با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی مزرعه حین دور زدن بود. هم‌چنین Hameed و همکاران (2010) روشی را برای تولید یک توصیف هندسی خودکار

1- ایده اصلی راهکارهای تجزیه سلولی فضای آزاد (free-space cellular decomposition) تبدیل مسئله پوشش کامل به مسئله پیمایش تعدادی سلول ساده‌تر و بدون هم‌پوشانی است؛ به طوری که با پوشش هر یک از این زیرنواحی با حرکات ساده رفت و برگشتی موسوم به بوستروفدون (boustrophedon) و پیمایش همه زیرنواحی، پوشش کامل تضمین می‌شود (Choset, 2001).

برگرفته از ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌سازی مبتنی بر مفهوم برخورد اعمال و نسخه اصلاح شده آن (M-BCD) ارائه می‌شود.

تغییر گام به گام جهت جاروب

برای تجهیز الگوریتم تجزیه بوستروفدون به روش موازی‌سازی اضلاع و دستیابی به یک حل بهینه، ایده امکان تغییر جهت جاروب در هر مرحله از پیشروی الگوریتم با هدف موازی‌سازی اضلاع تأثیرگذار مزرعه و تولید قطعاتی با شکل نسبتاً ایده‌آل در مجاورت آن‌ها مطرح می‌شود. بدین ترتیب که با آغاز فرآیند تجزیه، جهت بزرگ‌ترین ضلع مزرعه مبنای حرکت خط جاروب قرار می‌گیرد (ضلع شماره 1 در شکل 2)، به بیان دیگر راستای خط جاروب همان جهت بزرگ‌ترین ضلع مزرعه (ضلع مبنا) و جهت حرکت خط جاروب عمود بر جهت ضلع مبنا خواهد بود. با پیشروی خط جاروب و رسیدن به اولین رأس دارای تغییر در اتصال (نقطه بحرانی) تجزیه انجام می‌گیرد (نقطه D1 در شکل 2)، به این معنی که ضلع یا اضلاع جدیدی به موازات ضلع مبنا به مزرعه اضافه و قطعه ایجاد شده کنار گذاشته می‌شود. اگر طول یکی از اضلاع جدید اضافه شده به مزرعه، بزرگ‌تر از طول ضلع مبنا باشد، جهت جاروب تغییر نمی‌کند، در غیر این صورت با جستجو در اضلاع متعلق به ناحیه باقی‌مانده، بزرگ‌ترین ضلع انتخاب شده و مبنای حرکت خط جاروب قرار می‌گیرد. این مراحل تا اتمام فرآیند تجزیه (جاروب کامل سطح مزرعه) ادامه می‌یابد.

تقسیم مزرعه در محل اضلاع مبنا

برای ایجاد قطعاتی نسبتاً ایده‌آل در مجاورت هر یک از بزرگ‌ترین اضلاع مزرعه، در محل قرارگیری آنها یک برش انجام می‌شود. اگر امتداد این خط برش بلافاصله مرزهای بیرونی را قطع کند، این خط برش، یکی از اضلاع اصلی است، در غیر این صورت در محل ضلع بزرگ، سطح مزرعه تقسیم شده و یک ناحیه در پشت ضلع بزرگ و جزئی از ناحیه باقی‌مانده ایجاد می‌شود (مانند سطح A_1 در شکل 2). بدین ترتیب انتظار می‌رود در پایان فرآیند تقسیم مزرعه، قطعاتی ایده‌آل (مستطیل و دوزنقه) و نسبتاً ایده‌آل (نزدیک به دوزنقه) در مجاورت اضلاع بزرگ مزرعه به‌وجود آید که معمولاً دارای دو ضلع بزرگ و موازی هستند (شکل 2). بنابراین برخلاف دیگر روش‌ها در مطالعات پیشین، بدون نیاز به جستجوی اضافی و تحمیل زمان پردازش بیش‌تر، جهت بهینه‌راندگی در هر یک از قطعات به موازات ضلع مبنای آن قطعه انتخاب می‌شود. گام‌های الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده در جدول 1 آمده است.

مسافت‌های غیرمؤثر حین دور زدن‌ها¹ در مزرعه است. می‌توان گفت برخورد با مرزهای مزرعه می‌تواند پایه‌ای‌ترین عامل هزینه‌ساز با معیار مسافت‌های غیرمؤثر هنگام دور زدن‌ها باشد. در واقع با یک راهبرد پیشگیرانه اگر بتوان به‌طور قابل توجهی از برخورد با اضلاع مزرعه اجتناب کرد، می‌توان انتظار داشت هزینه نیز کاهش یابد. به بیان دیگر برای تحقق ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌ساز می‌توان از مسیریابی به موازات اضلاع مزرعه (با هدف عدم برخورد به آن‌ها) استفاده کرد. به‌عنوان یک نتیجه می‌توان گفت روش موازی‌سازی اضلاع و ایجاد قطعاتی در مجاورت اضلاع مزرعه، می‌تواند به‌عنوان یک راهکار ساده و عملی برای دستیابی به کاهش هزینه با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگامی در نظر گرفته شود.

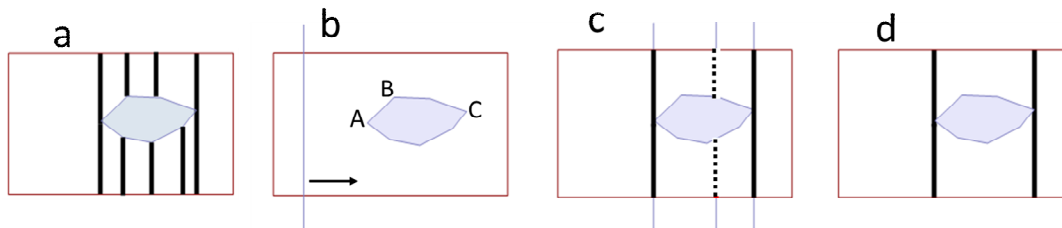
تجزیه سلولی بوستروفدون اصلاح شده² (M-BCD)

در تجزیه بوستروفدون از یک روش شناخته شده در حل مسائل هندسی تحت عنوان الگوریتم صفحه-جاروب (خط-جاروب) برای تجزیه سطح استفاده می‌شود. به‌طور مشخص، این خط با آغاز از یک جهت اولیه مبنا، سطح چندضلعی بیان‌گر محیط عملیات را جاروب می‌کند³. در تجزیه بوستروفدون، برخلاف تجزیه دوزنقه‌ای (شکل 1.a) تجزیه تنها در محل رأس‌های بحرانی انجام می‌شود (شکل 1.c). رأس بحرانی جایی است که در آن، تعداد اتصال خط جاروب تغییر کند یا بتوان در محل آن رأس، دو پاره‌خط به سمت بالا و پایین کشید: مانند رأس‌های A و C در شکل 1.b. این فرآیند تا جاروب کامل سطح در جهت مبنا ادامه می‌یابد. تجزیه بوستروفدون به‌طور کامل در مطالعه (Choset, 2000) ارائه شده است. در ادامه، دو اصلاح برای تجهیز این الگوریتم به روش موازی‌سازی اضلاع

1- بر اساس تحرکات واحد سیار عوامل زیر را می‌توان بر بازدهی عملیات زراعی مؤثر دانست: نخست مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگامی ناشی از انتقال بین نوارهای کاری (دور زدن‌ها)، دوم مسافت‌های غیرمؤثر ناشی از تردد بین قطعات حاصل از تجزیه مزرعه و سوم ترددهای غیر مؤثر به دلیل ناهماهنگی بین ماشین‌ها در عملیات مشارکتی به‌ویژه عدم تعیین دقیق نقاط دسترسی در عملیات ظرفیتی. مورد اول در همه نوع عملیات وجود دارد با این حال در عملیات ظرفیتی با حضور یک گروه مشارکتی از ماشین‌ها در مزارع بزرگ کم‌رنگ‌تر اما در محیط‌های پیچیده بسیار تأثیرگذار است. از این رو مسافت‌های غیر مؤثر پیموده شده در ناحیه سرگامی مزرعه در قالب معیارهای مختلفی مانند تعداد دور زدن‌ها، زمان دور زدن‌ها و مسافت پیموده شده حین دور زدن، هدف بهینه‌سازی عمده مطالعات طراحی مسیر بهینه در محیط‌های کشاورزی بوده است.

2- Modified Boustrophedon Cellular Decomposition (M-BCD)

3- استفاده از ابزارهای تجزیه سلولی با استفاده از الگوریتم صفحه-جاروب (Plane-sweep algorithm) وابسته به تعیین یک جهت مبنا برای جاروب سطح است. این وابستگی به دلیل وجود توابع هزینه متفاوت و حساس بودن آن‌ها به تغییرات جهت، یکی از چالش‌های روش‌های تجزیه سلولی است.



شکل 1- a: تجزیه ذوزنقه‌ای، b و c: مراحل تجزیه بوستروفدون با استفاده از الگوریتم خط- جاروب: تعداد اتصال خط جاروب از مقدار "یک" در رأس A به "دو" در محل رأس B تغییر می‌کند (اضلاع نقطه چین) و در محل رأس C به "یک" کاهش می‌یابد، در واقع A و C رأس‌های بحرانی هستند. d: تجزیه بوستروفدون

Fig. 1. a. Trapezoidal decomposition, b to d: Boustrophedon decomposition using plane-sweep algorithm. Connectivity of sweep line changes in location of points A and C (as critical points).

جدول 1- الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده (M-BCD)

Table 1- Modified boustrophedon cellular decomposition (M-BCD) algorithm

ورودی: چندضلعی P ارائه شده با لیستی از پاره‌خط‌های بیان‌گر اضلاع مزرعه
Input: Polygon P provided by a list of segments representing the edges of the field
خروجی: تجزیه مزرعه
Output: Decomposed field
0. شروع
0. Start (Get the list of segments representing the field).
1. ناحیه‌ی باقی‌مانده (R) را برابر با P قرار بده.
1. Set the remaining area (R) equal to the P.
2. مادامی که R مخالف "تهی" است:
2. While remaining area is not equal to "empty", do:
a. ضلع مینا را در R پیدا کن.
a. Find the base edge in (R)
b. در محل ضلع مینا، چندضلعی را برش بزن.
b. Cut the polygon in location of base edge
c. جهت جاروب را عمود به جهت ضلع مینا قرار بده.
c. Set the sweep line direction normal to the base edge direction
d. تجزیه بوستروفدون استاندارد را تا رسیدن به اولین رأس بحرانی اجرا کن.
d. Perform the boustrophedon decomposition algorithm reaching the first critical point
e. زیر ناحیه بسته شده را از R حذف کن. R را بروز کن.
e. Delete the recently closed sub region from R, update the R
3. تجزیه را به‌عنوان خروجی برگردان.
3. Return the decomposition
4. پایان
4. End

مزارع از پژوهش‌های قبل انتخاب شدند و نقاط رأسی آن‌ها استخراج گردید و برای محاسبات بعدی، شکل‌ها در ابعاد واقعی بزرگ‌سازی شدند. این مجموعه تقریباً همه موارد بررسی شده در پژوهش‌های مورد مقایسه را شامل می‌شود و در جدول 1 ارائه شده است. همچنین این مجموعه تنوع بالایی دارد و اشکال ساده (مزارع محدب و بدون مانع درونی) تا اشکال پیچیده (مزارع دارای تورفتگی‌های متعدد و یک

ارزیابی الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده
الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده با زبان برنامه‌نویسی ++C در محیط بسته نرم‌افزاری ویژوال استودیو 2013 پیاده‌سازی شد و روی یک رایانه همراه با مشخصات 2.5 GHz Intel(R) core i5 CPU با 4GB RAM به اجرا درآمد. برای آن که امکان مقایسه نتایج با پژوهش‌های قبلی فراهم شود، یک مجموعه از اشکال مختلف

محدودیت کاربرد در هر نوع چندضلعی بیان‌گر مزرعه (در مجموعه نمونه‌های انتخاب شده) نتایجی نزدیک به بهینه به‌ویژه در محیط‌های پیچیده نسبت به روش تجزیه و ادغام داشته است. مطابق جدول 1 الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده به‌طور متوسط دو درصد در مجموعه نمونه‌ها نسبت به روش تک‌جهت بهینه پوشش (حالت عدم تجزیه) و روش تجزیه و ادغام موفق به کاهش هزینه شده است، که مؤید کارایی ایده حداقل مواجهه با شرایط هزینه‌ساز مبتنی بر مفهوم برخورد است. اگرچه الگوریتم تجزیه بوستروفدون بهینه کاهش هزینه قابل توجهی را به‌ویژه در شکل‌های پیچیده نسبت به سایر روش‌های تجزیه ایجاد کرده است، اما امکان از دست رفتن جواب‌های بهینه در شکل‌های ساده وجود دارد که این ضعف، با اصلاحات جزئی می‌تواند رفع شود (مانند مزارع 9، 10، 12 و 13 از جدول 1). برای تبیین الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده و مقایسه آن با سایر روش‌ها نتایج چند حالت خاص در ادامه بررسی می‌شود.

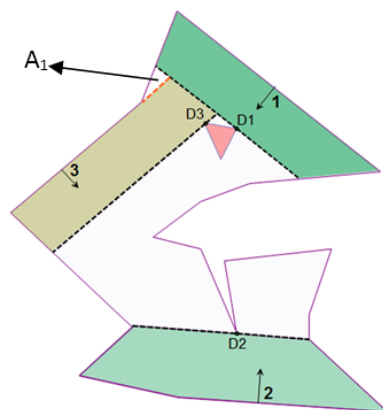
شکل 2 یک مزرعه نسبتاً ساده (مزرعه 1 در جدول نمونه‌ها) با چند نقطه تورفتگی را نشان می‌دهد که وجود یک مانع درونی در آن نتایج متفاوتی را در روش‌های مختلف ایجاد کرده است.

شکل a.2 نتیجه حاصل از اعمال الگوریتم تجزیه و ادغام بهینه Oksanen و Visala (2009) را نشان می‌دهد. در هر مرحله از پیشروی این الگوریتم، بهترین بلوک (ادغام شده از یک یا چند قطعه حاصل از تجزیه اولیه) انتخاب و از ناحیه اصلی کنار گذاشته می‌شود. این مراحل تا پایان فرآیند تجزیه تکرار می‌شود. در شکل b.2 نیز نتیجه حاصل از اعمال الگوریتم ابتکاری Jin و Tang (2010) مشاهده می‌شود.

یا چند مانع درونی) در آن دیده می‌شود. هم‌چنین الگوریتم تجزیه دوزنقه‌ای و ادغام، ارائه شده در مطالعه Driscoll (2011) برای مقایسه عملکرد الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده پیاده‌سازی گردید. این الگوریتم نسخه سریع الگوریتم تجزیه و ادغام زمان‌بر و بهینه Oksanen و Visala (2009) است. هر دو الگوریتم روی مجموعه نمونه‌ها اعمال شد. برای فراخوانی هر کدام از شکل‌ها، فایل متنی (txt) حاوی نقاط رأسی مزرعه با دو مختصات طول و عرض در هر مرتبه از اجرای الگوریتم به‌عنوان ورودی معرفی شد. هم‌چنین، هزینه پوشش سطح با معیار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی محاسبه شد. برای محاسبه هزینه، تابع هزینه توسعه یافته در مطالعه Jin و Tang (2010) برای یکی از مانورهای معمول ماشین‌های کشاورزی تحت عنوان مانورهای U-شکل استفاده شد. این مانور زمانی اجرا می‌شود که حداقل شعاع گردش ماشین نصف عرض کار است و ماشین با طی یک مسیر نیم دایره‌ای وارد ردیف بعدی می‌شود. در این پژوهش، عرض کار 10 متر و حداقل شعاع گردش 5 متر در نظر گرفته شد. هم‌چنین مقدار مسافت‌های غیرمؤثر ناحیه سرگاهی با فرض پوشش کل مزرعه در یک جهت بهینه کلی (حاصل از کمینه‌یابی تابع هزینه مانورهای U-شکل) به‌عنوان حالت عدم تجزیه مزرعه محاسبه شد.

نتایج و بحث



















الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده، کارایی محاسباتی بسیار بالایی دارد (زمان پردازش موردنیاز آن در حدود چند میلی‌ثانیه و ده‌ها برابر سریع‌تر از الگوریتم تجزیه و ادغام است). این الگوریتم، بدون



شکل 2- چند مرحله از تجزیه بوستروفدون اصلاح شده (M-BCD) در یک مزرعه با یک مانع درونی مثلث شکل. اعداد 1 تا 3 نشان‌دهنده سه ضلع بزرگ مزرعه هستند، D_i ها نیز نقاط بحرانی می‌باشند.

Fig. 2. Several steps of modified boustrophedon cellular decomposition (M-BCD) in a field with a triangular obstacle. Numbers 1 to 3 indicates 3-longest edges of the field, and D_i s are the critical points.

جدول 1- مقادیر مسافت‌های غیر مؤثر در ناحیه سرگاهی در تجزیه بوستروفدون اصلاح شده و سایر روش‌ها
Table 2- Area coverage cost in term of non-effective distance in three decomposition scenarios

مزرعه Field	شکل Shape	مسافت‌های غیر مؤثر (متر) Non-effective distance			کاهش مسافت‌های غیر مؤثر نسبت به روش‌های دیگر* Cost savings respect to other methods			
		تک جهت بهینه Optimal direction	تجزیه و ادغام Split-merge	تجزیه بوستروفدون اصلاح شده Modified boustrophedon	تک جهت بهینه Optimal direction		تجزیه و ادغام Split-merge	
					m	%	m	%
1		2015	2013	1900	115	6	113	6
2		1539	1539	1539	0	0	0	0
3		962	962	903	59	6	59	6
4		3720	3659	3732	-12	0	-74	-2
5		1634	1627	1634	0	0	-7	0
6		1485	1577	1473	13	1	104	7
7		2592	2592	2592	0	0	0	0
8		5054	4848	4340	714	14	508	10
9		2287	2287	2321	-33	-1	-33	-1
10		1083	1083	1170	-88	-8	-88	-8
11		1106	1106	1106	0	0	0	0
12		2318	2318	2429	-111	-5	-111	-5
13		2326	2326	2376	-50	-2	-50	-2
14		2089	2084	1939	150	7	145	7
15		2892	2892	2825	67	2	67	2
16		3044	3044	2931	113	4	113	4
17		5512	5512	5231	281	5	281	5
18		8055	8016	7039	1017	13	977	12
میانگین Average		2762	2749	2638	124	2	111	2

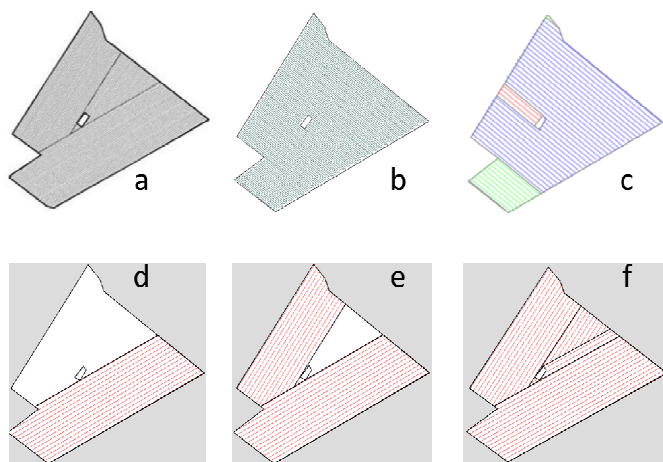
* علامت مثبت (+) نشان دهنده کاهش مسافت و علامت منفی (-) نشان دهنده افزایش مسافت است.

پوشش تمام مزرعه در یک جهت بهینه کلی کرده است. در شکل 2.c نیز خروجی الگوریتم تجزیه و ادغام (Driscoll 2011) مشاهده می‌شود. در این جا همانند الگوریتم ابتکاری Jin و Tang (2010) ابتدا یک جهت بهینه تعیین شده و در ادامه برخلاف الگوریتم تجزیه و ادغام (Visala و Oksanen 2009) تجزیه سطح عملیات و ادغام

هدف از این الگوریتم ارائه یک طرح پوشش بهینه (تجزیه بهینه و تعیین جهت بهینه پوشش در هر یک از قطعات) با استفاده توابع هزینه تعیین مسافت‌های غیر مؤثر ناحیه سرگاهی برای چند نوع از مانورهای معمول ماشین‌های کشاورزی است. چنان‌که مشخص است این الگوریتم بدون تجزیه سطح توصیه به

هم‌چنین جهت پوشش این قطعه موازی با جهت ضلع مینا است (شکل 2.d). ادامه این فرآیند در سمت چپ مزرعه در شکل 2.e و نتیجه نهایی تجزیه بوستروفدون اصلاح شده در شکل 2.f دیده می‌شود. الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده بدون نیاز به ادغام قطعات، تنها با یک بار جاروب سطح و در زمان بسیار اندک (7 میلی‌ثانیه و حدود 75 برابر سریع‌تر از روش تجزیه و ادغام با زمان 539 میلی‌ثانیه) نتیجه مشابهی با روش تجزیه و ادغام بهینه و زمان‌بر Oksanen و Visala (2009) ارائه کرده است. الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده توانسته است با 6 درصد کاهش در مسافت‌های غیرمؤثر (معادل 115 متر نسبت به حالت بدون تجزیه و 113 متر نسبت به الگوریتم تجزیه و ادغام) تجزیه را به‌طور مؤثر انجام دهد.

قطعات حاصل، تنها یک بار و در همان جهت بهینه انجام شده است. اگرچه الگوریتم با بررسی کاهش هزینه حاصل از ادغام قطعات، پنج قطعه تولید کرده است، اما جواب نهایی به یک جهت بهینه کلی تمایل دارد (بخش زیادی از سطح در یک جهت پوشش یافته است) و تنها 2 متر کاهش هزینه نسبت به حالت عدم تجزیه ایجاد کرده است (تفاوت آن با نتایج روش تجزیه و ادغام Oksanen و Visala (2009) قابل توجه است). هم‌چنین در شکل 2.d تا 2.f نتیجه حاصل از تجزیه بوستروفدون اصلاح شده دیده می‌شود. در اینجا ابتدا بزرگ‌ترین ضلع از سمت راست، مینای موازی‌سازی قرار گرفته است. در ادامه با پیشروی خط جاروب و رسیدن به اولین رأس از سمت راست مانع به‌عنوان رأس بحرانی، تجزیه را انجام داده است. یک قطعه نسبتاً ایده‌آل در کنار اولین ضلع بزرگ ایجاد شده است،



شکل 3- مزرعه 1 و نتایج حاصل از اعمال روش‌های تجزیه، a: تجزیه و ادغام (Oksanen and Visala, 2009)؛ b: الگوریتم ابتکاری (Jin and Tang, 2010)؛ c: تجزیه و ادغام (Driscoll, 2011)؛ d تا f: مراحل تجزیه بوستروفدون اصلاح شده (آغاز موازی‌سازی از ضلع بزرگ در سمت راست مزرعه (d) در ادامه آن موازی‌سازی ضلع بزرگ دوم در ناحیه باقی‌مانده (e) و نتیجه نهایی M-BCD (f)).

Fig. 3. Field 1 and results of decomposition scenarios: a: Spilt-merge by Oksanen and Visala (2009), b: Heuristic method by Jin, and tang (2010), c: Split-merge by Driscoll (2011), e to g: M-BCD.

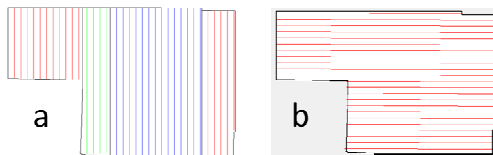
عملیات تنها در شرایط ضروری تجزیه می‌شود و مزیت آن را می‌توان عدم تحمیل گام زمان‌بر ادغام به الگوریتم و تولید بزرگ‌ترین قطعه عملیات‌پذیر دانست (شکل 2.d تا 2.f). با این حال در الگوریتم ابتکاری Jin و Tang (2010) این نکته مد نظر قرار نگرفته است (شکل 2.b).

بر اساس نتایج به‌دست آمده، مواردی وجود دارد (مانند مزارع 2، 5، 7 و 11 در جدول 1) که هزینه الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده با حالت عدم تجزیه یکسان است. در واقع در این موارد، جهت ضلع بزرگ همان جهت بهینه پوشش است. اما همیشه جهت

نکته مهم دیگری که در اینجا باید گفت ضرورت تجزیه در رأس‌های بحرانی (نقاط دارای تغییر در اتصال خط جاروب) ضمن فرآیند تجزیه سطح عملیات است. نقاط دارای تغییر در اتصال یک تعبیر اجرایی - عملیاتی دارد و آن، عدم امکان اجرای پیوسته عملیات پوششی (بدون حرکات بازگشتی) در نواحی اطراف این نقاط است و با تجزیه سطح در محل این نقاط، برنامه‌ریزی حرکت بین قطعات میسر می‌شود. این نکته در مطالعات Oksanen و Visala (2009) و Driscoll (2011) به‌طور ضمنی اشاره شده است، اما در الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده، تجزیه سطح منحصر به این نقاط است. با این کار سطح

سطح در جهتی یکسان با ضلع بزرگ (ضلع مبنای موازی‌سازی) پوشش یافته است. بر اساس نتایج ذکر شده در جدول 1، در این مزرعه خاص روش تجزیه بوستروفدون اصلاح شده 8 درصد معادل 88 متر نسبت روش تک جهت بهینه و همچنین به طور مشابه نسبت به روش تجزیه و ادغام هزینه بیش‌تری تحمیل کرده است.

ضلع بزرگ لزوماً جهت بهینه نیست و احتمال از دست رفتن جواب‌های بهینه وجود دارد. شکل 3 یک مزرعه ساده (مورد 10 در جدول 1) را نشان می‌دهد که دارای اضلاع متعامد است. در این مورد خط جاروب به موازات ضلع بزرگ در بالای مزرعه پیشروی خود را آغاز کرده و در ادامه به سمت پایین حرکت می‌کند، اما به دلیل عدم وجود نقطه بحرانی طی پیشروی آن تجزیه‌ای انجام نشده و تمام

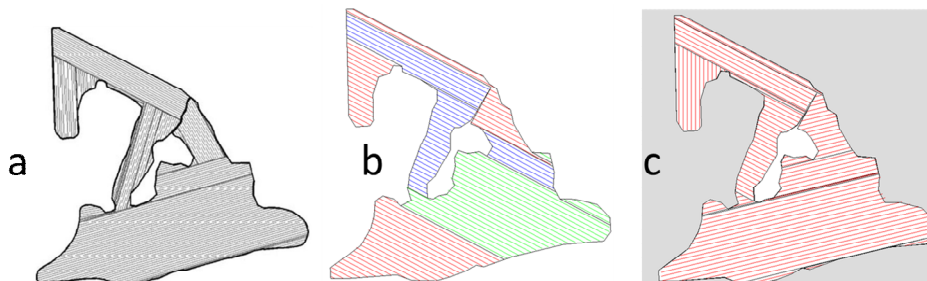


شکل 4- مزرعه 10 و نتایج حاصل از اعمال روش‌های تجزیه a: روش تجزیه و ادغام (Driscoll, 2011)، b: الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده

Fig. 4. Field 10 and results of decomposition scenarios, Left: Split-merge by Driscoll (2011), Right: Modified boustrophedon cellular decomposition (M-BCD)

شکل 4 یک مزرعه پیچیده (مزرعه 17 از جدول 1) را با تعداد زیاد اضلاع (حدود 90 ضلع) و نقاط تورفته متعدد و یک مانع درونی با شکلی غیر منظم نشان می‌دهد. تجزیه بوستروفدون اصلاح شده در زمانی بسیار اندک (87 میلی‌ثانیه و حدود 40 مرتبه سریع‌تر از روش تجزیه و ادغام با زمان 3585 میلی‌ثانیه) به خوبی توانست قطعاتی نسبتاً ایده‌آل در مجاورت اضلاع اصلی مزرعه ایجاد کند. کاهش هزینه در این مورد، مقدار 5 درصد برابر با 281 متر نسبت به روش تک جهت بهینه به دست آمد. همچنین نتایج، با روش زمان‌بر تجزیه و ادغام (Oksanen and Visala, 2009) بسیار مشابه است و می‌تواند کارایی الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده را نشان دهد. می‌توان دید که طرح پوشش به دست آمده از روش تجزیه و ادغام Driscoll (2011) هم‌چون موارد قبل به یک جهت بهینه کلی تمایل دارد (شکل 4.b).

نتایج مشابهی نیز برای مزارع 9، 12 و 13 به دست آمده است که در بدترین حالت (مزرعه 12) فقط 5 درصد معادل 111 متر نسبت به سایر روش‌های تجزیه هزینه بیش‌تری تحمیل شده است. در توضیح این نتیجه باید گفت که تأکید تجزیه بوستروفدون اصلاح شده بر نقاط دارای تغییر در اتصال است و از ایده امکان تغییر جهت جاروب در هر مرحله از پیشروی الگوریتم برای دستیابی به کاهش هزینه استفاده می‌کند. بدیهی است که این فرصت در شکل‌های ساده، کم‌تر به وجود می‌آید و انتظار می‌رود در بعضی موارد، جواب بهینه از دست برود. با این همه، این موارد با تعیین جهت جاروب بر اساس یک تابع هزینه یا تعبیه یک گام کنترل (مقدار هزینه در جهت بهینه کلی) در پایان فرآیند تجزیه به سادگی رفع می‌شود. چنان‌که پیش‌تر گفته شد، روش تجزیه بوستروفدون اصلاح شده به‌ویژه در محیط‌های پیچیده قابلیت زیادی برای کاهش هزینه دارد.



شکل 5- مزرعه 17 و نتایج حاصل از اعمال روش‌های تجزیه a: روش تجزیه و ادغام (Oksanen and Visala, 2009) b: روش تجزیه و ادغام (Driscoll, 2011) c: تجزیه بوستروفدون اصلاح شده

Fig. 5. Filed 17 and results of decomposition scenarios, Left: Split-merge by Oksanen and Visala (2009), Middle: split-merge by Driscoll (2011), Right: Optimal solution by (M-BCD)

مسافت‌های غیرمؤثر را به‌طور مناسبی کاهش دهد و نتایجی بهینه را در زمان بسیار اندک ارائه کند. الگوریتم بدون نیاز به ساز و کار زمان‌بر تجزیه و ادغام، قادر به کاهش هزینه پوشش سطح است. دیگر این که طرح تجزیه و پوشش حاصل از این الگوریتم، قابلیت اجرای بالایی دارد و حتی با ماشین‌های مرسوم در کشاورزی نیز سازگار است.

عملکرد الگوریتم در محیط‌های پیچیده بسیار موفق بود و کاهش هزینه در این موارد قابل توجه است، با این حال در محیط‌های ساده، از دست رفتن جواب‌های بهینه را می‌توان انتظار داشت که این ضعف، با افزودن یک گام ارزیابی (هزینه در یک جهت بهینه کلی) به سادگی رفع می‌شود. همچنین تأکید اصلی الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده بر موازی‌سازی مناسب‌ترین تک ضلع‌ها از چندضلعی بیان‌گر مزرعه است؛ برای بهبود الگوریتم، این گزینه می‌تواند با مناسب‌ترین زنجیره‌های چندضلعی با یک انتخاب مناسب جایگزین شود. با این ارتقاء امکان دست‌یابی به کاهش هزینه قابل توجه در محیط‌های دارای مرزهای منحنی نیز وجود دارد (مانند مزارع 15 و 16 از جدول 1).

الگوریتم ارائه شده قابلیت‌های ویژه‌ای دارد و می‌تواند به‌عنوان بخش مهمی از واحد پیکربندی در سامانه‌های طراحی مسیر برای توصیف محیط عملیات و تولید یک نقشه راهبری برای مسیریابی وسایل نقلیه کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد. با این حال محدودیت‌هایی وجود دارد: الگوریتم تجزیه اصلاح شده، سطح را به‌طور دلخواه تجزیه می‌کند؛ از این رو کاربرد آن در کشت‌های ردیفی، محدود به تولید تعدادی زیرنواحی ساده و بدون مانع در جهت ردیف‌های کشت می‌شود. همچنین این الگوریتم در مزارع دارای ناهمواری‌های قابل توجه، کارایی نداشته و طراحی ویژه‌ای در این شرایط مورد نیاز است. مهم‌تر از همه، تعیین تردد بهینه بین قطعات حاصل از تجزیه است که در توان راهکارهای مسیریابی است و برای مطالعه بعدی پیشنهاد می‌شود. همچنین این الگوریتم، نیازمند ارزیابی عملی در سطح مزرعه با استفاده از ماشین‌های کشاورزی خودراهربر و یا ربات‌های سیار است.

مزارع 6، 8، 14 و 17 از جدول 1 نمونه‌های دیگری از مزارع پیچیده هستند که مقدار کاهش هزینه در آن‌ها نسبت به حالت عدم تجزیه و روش تجزیه و ادغام قابل توجه است. برای نمونه الگوریتم تجزیه بوستروفدون اصلاح شده در مزرعه 8 از جدول 1 مقدار 14 درصد برابر با 714 متر نسبت به روش تک جهت بهینه و 10 درصد برابر با 508 متر نسبت به روش تجزیه و ادغام مسافت‌های غیرمؤثر را کاهش داده است.

نکته دیگر این که طی فرآیند تجزیه تعدادی ضلع جدید به مزرعه اضافه می‌شود که آن‌ها را می‌توان مرزهای مجازی مزرعه دانست. با توجه به این نکته، یکی از مزیت‌های اصلی تجزیه بوستروفدون اصلاح شده این است که طرح تجزیه حاصل از آن، قابلیت اجرای بالایی داشته و با ماشین‌های مرسوم نیز سازگار است. دو دلیل برای آن وجود دارد: اول این که تجزیه بوستروفدون اصلاح شده تنها بر رأس‌های بحرانی تأکید دارد و این نقاط، مکان‌هایی برجسته از محیط عملیات و مرزهای واقعی مزرعه بوده و شناسایی آن‌ها ساده و امکان‌پذیر است. دیگر آن که در این الگوریتم، چیدمان مسیرهای پوششی به موازات اضلاع مزرعه است، (مانند شکل c.2 تا d.3 و شکل c.4). در نتیجه با آغاز عملیات از کنار اضلاع مزرعه (و حرکت به موازات آن‌ها) و رسیدن به محل رأس‌های بحرانی قطعه جاری پایان می‌یابد و مرزهای مجازی به مرزهای واقعی تبدیل می‌شوند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک الگوریتم تجزیه چندضلعی بیان‌گر مزارع مسطح (با ناهمواری‌های قابل اغماض) برای حل مسئله طراحی مسیر پوششی ارائه شد. این الگوریتم، نسخه اصلاح شده و ارتقاء یافته روش تجزیه سلولی بوستروفدون در رباتیک است. این الگوریتم برخلاف بعضی از روش‌های پیشین، محدودیت کاربرد در هیچ محیط عملیاتی از پیش شناخته شده و توصیف شده با موجودیت هندسی چندضلعی را ندارد. نتایج نشان داد که انتخاب الگوریتم تجزیه بوستروفدون و تجهیز آن به روش موازی‌سازی اضلاع چند ضلعی، توانست

References

1. Ali, O., B. Verlinden, and D. Van Oudheusden. 2009. Infield logistics planning for crop-harvesting operations. *Engineering Optimization* 41: 183-197.
2. Bochtis, D. D., C. G. C. Sørensen, and P. Busato. 2014. Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems Engineering* 126: 69-81.
3. Bochtis, D. D., and C. G. Sørensen. 2009. The vehicle routing problem in field logistics part I. *Biosystems Engineering* 104: 447-457.
4. Bochtis, D. D., and C. G. Sørensen. 2010. The vehicle routing problem in field logistics: Part II. *Biosystems engineering* 105 (2): 180-188.
5. Bochtis, D. D., C. G. Sørensen, P. Busato, and R. Berruto. 2013. Benefits from optimal route planning

- based on B-patterns. *Biosystems Engineering* 115: 389-395.
6. Bochtis, D. D., S. Vougioukas, C. Tsatsarelis, and Y. Ampatzidis. 2007. Optimal dynamic motion sequence generation for multiple harvesters. In *Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment (ATOE) 2006 Conference, Bonn, Germany* (pp. 33-40).
 7. Choset, H. 2000. Coverage of known spaces: The boustrophedon cellular decomposition. *Autonomous Robots* 9 (3): 247-253.
 8. Choset, H. 2001. Coverage for robotics—A survey of recent results. *Annals of mathematics and artificial intelligence* 31 (1-4): 113-126.
 9. Driscoll, T. M. 2011. Complete coverage path planning in an agricultural environment. Graduate Theses and Dissertations. Paper 12095. Faculty of computer. Iowa state University. USA.
 10. Edwards, G., and M. A. F. Jensen. 2013. Real Time Optimisation of Field Coverage Route Planning with Limited Capacitance Machinery and Spatial Variability. *International Commission of Agricultural and Biological Engineers, Section V. CIOSTA XXXV Conference "From Effective to Intelligent Agriculture and Forestry"*, Billund, Denmark, 3-5 July 2013.
 11. Hameed, I. A., D. D. Bochtis, and C. G. Sørensen. 2013. An optimized field coverage planning approach for navigation of agricultural robots in fields involving obstacle areas. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 10 (231): 1-9.
 12. Hameed, I. A., D. D. Bochtis, C. G. Sørensen, and M. Nøremark. 2010. Automated generation of guidance lines for operational field planning. *Biosystems Engineering* 107: 294-306.
 13. Hofstee, J. W., L. E. E. M. Späthjens, and H. Ijken. 2009. Optimal path planning for field operations. In *Proceedings of the 7th European conference on precision agriculture Precision Agriculture 09* (pp. 521-529). Netherlands: Wageningen.
 14. Jensen, M. A. F., D. Bochtis, C. G. Sørensen, M. R. Blas, and K. L. Lykkegaard. 2012. In-field and inter-field path planning for agricultural transport units. *Computers & Industrial Engineering*, 63: 1054-1061.
 15. Jin, J., and L. Tang. 2010. Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces. *Transactions of the ASABE*, 53 (1): 283-295.
 16. Moon, S. W., and D. H. C. Shim. 2009. Study on path planning algorithms for unmanned agricultural helicopters in complex environment. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences* 10 (2): 1-11.
 17. Murphy, R. 2000. *Introduction to AI robotics*. MIT press.
 18. Oksanen, T., and A. Visala. 2009. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines. *Journal of Field Robotics* 26 (8): 651-668.
 19. Ryerson, A. F., and Q. Zhang. 2006. Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms. *Vehicle path planning for complete field coverage using genetic algorithms*. In *Proceedings of the Automation Technology for Off-road Equipment (ATOE) 2006 Conference, Bonn, Germany* (pp. 309-317).
 20. Taïx, M., P. Souères, H. Frayssinet, and L. Cordesses. 2006. Path planning for complete coverage with agricultural machines. In *Field and service robotics* pp. 549-558. Springer Berlin Heidelberg.
 21. Zhou, K., A. Leck Jensen, C. G. Sørensen, P. Busato, and D. D. Bochtis. 2014. Agricultural operations planning in fields with multiple obstacle areas. *Computers and Electronics in Agriculture* 109: 12-22.

Presentation of a Modified Boustrophedon Decomposition Algorithm for Optimal Configuration of Flat Fields to use in Path Planning Systems of Agricultural Vehicles

R. Goudarzi¹ - H. Sadrnia^{2*} - A. Rohani³ - M. Nouribaygi⁴

Received: 24-08-2016

Accepted: 13-05-2017

Introduction

The demand of pre-determined optimal coverage paths in agricultural environments have been increased due to the growing application of field robots and autonomous field machines. Also coverage path planning problem (CPP) has been extensively studied in robotics and many algorithms have been provided in many topics, but differences and limitations in agriculture lead to several different heuristic and modified adaptive methods from robotics. In this paper, a modified and enhanced version of currently used decomposition algorithm in robotics (boustrophedon cellular decomposition) has been presented as a main part of path planning systems of agricultural vehicles. Developed algorithm is based on the parallelization of the edges of the polygon representing the environment to satisfy the requirements of the problem as far as possible. This idea is based on "minimum facing to the cost making condition" in turn, it is derived from encounter concept as a basis of cost making factors.

Materials and Methods

Generally, a line termed as a slice in boustrophedon cellular decomposition (BCD), sweeps an area in a pre-determined direction and decomposes the area only at critical points (where two segments can be extended to top and bottom of the point). Furthermore, sweep line direction does not change until the decomposition finish. To implement the BCD for parallelization method, two modifications were applied in order to provide a modified version of the boustrophedon cellular decomposition (M-BCD). In the first modification, the longest edge (base edge) is targeted, and sweep line direction is set in line with the base edge direction (sweep direction is set perpendicular to the sweep line direction). Then Sweep line moves through the environment and stops at the first (nearest) critical point. Next sweep direction will be the same as previous, If the length of those polygon's newly added edges, during the decomposition, are less than or equal to the base edge, otherwise a search is needed to choose a new base edge. This process is repeated until a complete coverage. The second modification is cutting the polygon in the location of the base edge to generate several ideal polygons beside the base edges. The algorithm was applied to a dataset (including 18 cases, ranging from simple-shaped to complex-shaped polygons) gathered from other studies and was compared with a split-merge algorithm which has been used in some other studies. The M-BCD algorithm was coded in C++ language using Microsoft Visual Studio 2013 software. Algorithm was run on a laptop with 2.5 GHz Intel(R) core™ i5-4200M CPU, processor with 4 GB of RAM. Also Split-merge algorithm provided by Driscoll (2011) was coded. Two algorithms were applied to the dataset. Cost of coverage plan was calculated using cost function of U-shaped turns in study Jin and Tang (2010). In this paper machine-specific parameters were working width 10 m and minimum turning radius 5 m.

Results and Discussion

Based on the results, the proposed algorithm has low computational time (below 100 ms in dataset and runs many times (on average 75 times) faster than split-merge algorithm. Algorithm resulted in a calculated savings

1- Graduated Student, Agricultural Mechanization Engineering, Department of Biosystems Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

2- Associate Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

3- Assistant Professor, Department of Biosystems Engineering, Faculty of Agriculture, Ferdowsi University of Mashhad

4- Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad

(*- Corresponding Author Email: hassan.sadrnia@um.ac.ir)

up to 12% and on average 2% than the split-merge algorithm. Another consequence from parallelization method was effectiveness of multi-optimal direction coverage pattern than a single-optimal direction coverage; a calculated savings up to 14% and 2% on average than a single optimal direction achieved. Algorithm was evaluated on several test cases in detail. Based on the results, it is possible to loose optimal solutions especially in the case of simple shaped environments (in terms of number of convex points and internal obstacles), for example case 10 in dataset, is a case with a number of orthogonal edges. Reviewing the algorithm and Figure 4 demonstrate that sweep line moves down from the first longest edge in top of the polygon, and it doesn't stop during the process until the whole area is covered with a single coverage path direction (parallel to the longest edge). As it can be seen, no decomposition is proposed, because sweep line has faced no critical points. Based on the results in Table 2, there is 8% (equal to 88m) more cost (in term of the non-effective distance) in this case than an optimal direction and the split-merge algorithm. There are similar cases in the dataset: number 9, 12 and 13. This condition rarely occurs in complex environments, but in general it can be prevented by using an evaluation step at the end of the decomposition process. Ideally, the cost of coverage plan must be significantly less than related costs of a single optimal direction. Unlike the simple cases, algorithm returns near the optimal solution, especially in the case of complex environments. A good example of this ability of the algorithm can be seen in Figure 6. This field is case 17 in the dataset. It has many edges (almost 90 edges) and several non-convex points and an internal irregular shaped obstacle. M-BCD algorithm in a very short time (87 ms) generated several near to ideal shaped sub-regions around the field. Algorithm resulted in a calculated saving of 5% than an optimal direction with minimum non-effective distance. We can see the solution of split-merge algorithm by Oksanen and Visala (2009) in Figure 6, it can be clearly seen that coverage pattern by M-BCD is very close to the high time-consuming and optimal split-merge algorithm by Oksanen and Visala (2009). It verifies that M-BCD is efficient and optimal. There are similar test cases as hard cases in which considerable savings has been achieved (cases 6, 8 and 14).

Conclusions

In this paper a modified decomposition algorithm as a main part of path planning systems in agricultural environments was presented. Proposed algorithm uses method of parallelization of the edges of polygon. This method is based on encounter concept and "minimum facing to cost making condition". Although the general problem had been proved to be NP-hard problem, the method has limited the search space correctly and effectively which resulted close to the optimal solutions quickly. Another advantage of the method is suitability of the solutions for any kind of machine and any polygonal flat field (and those which can be considered as flat fields).

Keywords: Agricultural vehicles, Boustrophedon decomposition algorithm, Flat fields, Field configuration, Path planning