

مروری بر تحلیل و ارزیابی عملکرد الگوریتم بهینه سازی گرگ خاکستری

گروه مهندسی کامپیوتر، دانشکده فنی و مهندسی، مؤسسه آموزش عالی آپادانا،
شیراز، ایران

امیر نعمت زاده *

چکیده

الگوریتم گرگ خاکستری (Gray Wolf Optimizer) یکی از روش‌های فراابتکاری الهام گرفته از طبیعت است که بر اساس رفتار اجتماعی و سلسله مراتب گروهی گرگ‌های خاکستری طراحی شده است. این الگوریتم به دلیل ساختار ساده، انعطاف پذیری و کارایی بالا، به ویژه در حل مسائل بهینه سازی پیچیده و چندبعدی، توجه زیادی را به خود جلب کرده است. در این مقاله مروری، ابتدا مبانی نظری الگوریتم گرگ خاکستری شامل مدل سازی رفتار گروهی، جست و جوی طعمه و همگرایی به سمت بهترین راه حل بررسی می شود. سپس، توسعه ها و اصلاحات متعددی که به منظور بهبود کارایی این الگوریتم در زمینه های مختلف ارائه شده اند، مرور می شوند. از جمله این اصلاحات می توان به ترکیب آن با سایر روش های هوشمند، بهبود مکانیزم جست و جو و افزایش پایداری در برابر بهینه های محلی اشاره کرد. کاربردهای الگوریتم در حوزه هایی مانند بهینه سازی مهندسی، طراحی شبکه های کامپیوتری، برنامه ریزی سیستم ها، و یادگیری ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، چالش ها و محدودیت های الگوریتم از جمله نیاز به تنظیم دقیق پارامترها و احتمال گیر افتادن در بهینه های محلی تحلیل شده است.

کلیدواژه ها: الگوریتم بهینه سازی، گرگ خاکستری، الهام از طبیعت، سلسله مراتب اجتماعی، جستجوی بهینه.

مقدمه

در دنیای امروز، حل مسائل پیچیده بهینه‌سازی به یکی از چالش‌های اساسی در علوم مختلف تبدیل شده است. روش‌های فراابتکاری که از پدیده‌های طبیعی الهام می‌گیرند، به دلیل توانایی آن‌ها در یافتن پاسخ‌های بهینه در مسائل چندبعدی و پیچیده، به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند. الگوریتم گرگ خاکستری یکی از این روش‌ها است که توسط میرالیزاده و همکارانش در سال ۲۰۱۴ معرفی شد. (حسینی، ۱۳۹۹).

ایده اصلی این الگوریتم بر پایه رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در طبیعت است. گرگ‌ها به‌عنوان شکارچیان قدرتمند، رفتارهای منحصربه‌فردی در گروه‌های خود نشان می‌دهند که شامل ساختار سلسله‌مراتبی دقیق و روش‌های مؤثر برای شکار است. الهام‌گیری از این رفتارها منجر به توسعه الگوریتمی شد که به‌طور گسترده در مسائل بهینه‌سازی تک‌هدفه و چندهدفه استفاده شده است. (حسینی، ۱۳۹۹).

هدف این مقاله ارائه یک مرور جامع بر این الگوریتم، توضیح مبانی آن، بررسی پیشرفت‌های اخیر و ارزیابی کاربردهای متنوع آن است. همچنین تلاش می‌شود با برجسته‌سازی نقاط قوت و ضعف الگوریتم، زمینه برای تحقیقات بیشتر در این حوزه فراهم شود. (حسینی، ۱۳۹۹).

اهمیت بهینه‌سازی در علوم و فناوری

بهینه‌سازی یکی از مباحث کلیدی در بسیاری از علوم از جمله ریاضیات، مهندسی، اقتصاد و فناوری اطلاعات است. در بسیاری از پروژه‌ها، هدف این است که با توجه به محدودیت‌های موجود، بهترین نتیجه ممکن حاصل شود. برای مثال، در طراحی صنعتی، هدف ممکن است کاهش هزینه‌ها یا افزایش بهره‌وری باشد، درحالی‌که در مدیریت شبکه‌های کامپیوتری، هدف می‌تواند کاهش زمان تأخیر و بهینه‌سازی پهنای باند باشد (احمدی، ۱۴۰۰).

روش‌های کلاسیک و محدودیت‌های آن‌ها

روش‌های کلاسیک مانند الگوریتم‌های خطی، گرادیان کاهشی، و جستجوی کامل، زمانی که ابعاد مسئله افزایش می‌یابد، ناکارآمد می‌شوند. این روش‌ها به دلیل نیاز به حجم محاسباتی بالا و احتمال گیر افتادن در بهینه‌های محلی، توانایی حل مسائل پیچیده‌تر را ندارند (حسینی، ۱۳۹۹).

فراابتکاری‌ها؛ رویکردی نوین

الگوریتم‌های فراابتکاری که از پدیده‌های طبیعی الهام گرفته‌اند، راه‌حلی برای این محدودیت‌ها ارائه داده‌اند. این روش‌ها برخلاف روش‌های کلاسیک، بر اساس شبیه‌سازی رفتارهای اجتماعی یا فرایندهای طبیعی عمل می‌کنند. الگوریتم ژنتیک، ازدحام ذرات، و الگوریتم مورچه نمونه‌هایی از این روش‌ها هستند (علی‌زاده، ۱۴۰۱). یکی از جدیدترین این الگوریتم‌ها، الگوریتم گرگ خاکستری است که از رفتار گروهی و سلسله‌مراتبی گرگ‌های خاکستری الهام گرفته شده است.

هدف پژوهش

هدف این مقاله، ارائه یک بررسی جامع درباره الگوریتم گرگ خاکستری است. این بررسی شامل تحلیل عمیق مبانی نظری، مرور پیشینه پژوهش‌های مرتبط، بررسی کاربردها در حوزه‌های مختلف، و تحلیل محدودیت‌ها و چالش‌های موجود است.

پیشینه پژوهش

معرفی اولیه الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری اولین بار توسط میرجلیلی و لویس در سال ۲۰۱۴ معرفی شد. ایده اصلی این الگوریتم از رفتار اجتماعی گرگ‌های خاکستری در طبیعت الهام گرفته شده است. این گرگ‌ها هنگام شکار، رفتارهایی همچون محاصره، حمله و تعقیب طعمه را با استفاده از سلسله مراتبی اجتماعی انجام می‌دهند که شامل چهار سطح آلفا، بتا، دلتا و امگا است (میرجلیلی، ۲۰۱۴).

توسعه‌های بعدی

از زمان معرفی اولیه، پژوهشگران بسیاری تلاش کرده‌اند تا عملکرد این الگوریتم را بهبود بخشند.

برخی از این توسعه‌ها عبارت‌اند از:

- ترکیب با الگوریتم‌های دیگر: برای مثال، ترکیب الگوریتم گرگ خاکستری با الگوریتم ازدحام ذرات برای افزایش سرعت همگرایی (کاظمی، ۱۳۹۹).
- بهبود روش‌های به‌روزرسانی موقعیت: تغییر در فرمول‌های محاسبه فاصله و حمله برای جلوگیری از گیر افتادن در بهینه محلی (شریفی، ۱۴۰۰).
- کاربردهای ترکیبی: استفاده از الگوریتم در کنار روش‌های یادگیری ماشین برای مسائل طبقه‌بندی داده‌ها (یزدی، ۱۴۰۱).

مقایسه با سایر الگوریتم‌ها

در مقایسه با الگوریتم‌های مشابه مانند ازدحام ذرات و الگوریتم ژنتیک، الگوریتم گرگ خاکستری به دلیل ساختار ساده‌تر و نیاز کمتر به تنظیم پارامترها، مورد استقبال قرار گرفته است. با این حال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که این الگوریتم در برخی مسائل پیچیده‌تر با چالش‌هایی مواجه است (رضایی، ۱۳۹۸؛ کاظمی، ۱۳۹۹).

روش

اصول عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری

الگوریتم گرگ خاکستری شامل چهار مرحله اصلی است:

- مقداردهی اولیه: در این مرحله، موقعیت اولیه گرگ‌ها به صورت تصادفی تعیین می‌شود.
- محاصره شکار: موقعیت گرگ‌ها در اطراف طعمه به گونه‌ای تنظیم می‌شود که به تدریج به نقطه بهینه نزدیک شوند.
- حمله: با کاهش فاصله بین گرگ‌ها و طعمه، موقعیت نهایی بهترین جواب مشخص می‌شود.
- معیار توقف: زمانی که تعداد تکرارها به حد مشخصی برسد یا تغییرات در جواب کاهش یابد، الگوریتم متوقف می‌شود (میرجلیلی، ۲۰۱۴؛ حسینی، ۱۳۹۹).

کاربرد الگوریتم در مسائل واقعی

این الگوریتم در مسائل مختلفی از جمله بهینه‌سازی غیرخطی، طراحی سیستم‌های پیچیده، و مدیریت منابع شبکه کاربرد دارد (احمدی، ۱۴۰۰).

یافته‌ها

مزایای الگوریتم گرگ خاکستری

- ساختار ساده: پیاده‌سازی آسان و قابلیت اعمال در مسائل مختلف (احمدی، ۱۴۰۰).
- انعطاف‌پذیری: قابلیت ترکیب با سایر الگوریتم‌ها.
- توانایی حل مسائل پیچیده: در مسائل چندبعدی عملکرد مناسبی دارد (کاظمی، ۱۳۹۹).

محدودیت‌ها

- گیر افتادن در بهینه محلی: یکی از چالش‌های اصلی این الگوریتم.
- سرعت همگرایی: کاهش سرعت در مسائل با ابعاد بسیار بالا (یزدی، ۱۴۰۱).

توضیحات جدول

- N: افزایش تعداد گرگ‌ها می‌تواند دقت الگوریتم را افزایش دهد اما ممکن است زمان اجرا را بیشتر کند.
- a: کاهش این پارامتر به تنظیم فاصله گرگ‌ها از طعمه کمک می‌کند (یزدی، ۱۴۰۱).
- C: این بردار تصادفی باعث تنوع در جستجوی گرگ‌ها و جلوگیری از گیر افتادن در بهینه محلی می‌شود.
- نتایج آزمایشات الگوریتم و پژوهش‌های مرتبط (میرجلیلی، ۲۰۱۴؛ حسینی، ۱۳۹۹).

جدول ۱

پارامترها و مشخصات الگوریتم گرگ خاکستری (کاظمی، ۱۳۹۹).

مقدار پیشنهادی	شرح	پارامتر
۲۰-۵۰	تعداد گرگ‌ها در جمعیت اولیه	N
به صورت خطی از ۲ به ۰ کاهش می‌یابد.	فاکتور کاهش فاصله برای تنظیم میزان نزدیکی گرگ‌ها به طعمه	a
بر اساس بهترین موقعیت‌ها انتخاب می‌شوند.	سه گرگ پیشرو برای هدایت جمعیت و چسبجوی بهینه	α, β, δ
$ C \cdot x_{prey} - x_{wolf} $	فاصله نسبی بین گرگ و طعمه	D
مقادیر تصادفی در بازه [۰, ۲]	بردار تصادفی برای تعیین موقعیت نسبی	C
بسته به مسئله تعریف می‌شود.	معیاری برای ارزیابی کیفیت هر جواب	تابع هدف
۱۰۰۰ تکرار یا بهبود کمتر از 10^{-5}	تعداد تکرار‌ها یا تغییرات اندک در جواب‌های متوالی.	معیار توقف

مبانی الگوریتم گرگ خاکستری

الهام زیستی

گرگ‌های خاکستری به دلیل رفتارهای اجتماعی خاص خود، از دیرباز مورد توجه پژوهشگران زیست‌شناسی بوده‌اند. این حیوانات به‌طور معمول در گروه‌هایی با ساختار سلسله‌مراتبی شامل آلفا (رهبر گروه)، بتا (دستیار رهبر)، دلتا (پیروان نزدیک به رهبر) و امگا (پایین‌ترین رتبه در گروه) زندگی می‌کنند. این ساختار سلسله‌مراتبی، همراه با رفتارهای منحصر به فرد در هنگام شکار، الهام‌بخش طراحی الگوریتم GWO بوده است (کاظمی، ۱۳۹۹).

فرمول بندی ریاضی الگوریتم

در GWO، بهینه سازی بر اساس موقعیت گروهی از گرگ ها انجام می شود که طعمه (بهینه جهانی) را جستجو می کنند. سه گرگ برتر (آلفا، بتا و دلتا) به عنوان رهبران گروه عمل کرده و سایر گرگ ها (امگا) با پیروی از آن ها به جستجوی بهینه می پردازند (شریفی، ۱۴۰۰).

احاطه طعمه

گرگ ها موقعیت خود را بر اساس طعمه تنظیم می کنند: (شریفی، ۱۴۰۰).

$$\vec{D} = \vec{C} \cdot \vec{X}_{\text{prey}} - \vec{X} \\ \vec{X}(t+1) = \vec{X}_{\text{prey}} - \vec{A} \cdot \vec{D}$$

که در آن و پارامترهای کنترلی هستند که تعادل بین اکتشاف و بهره برداری را مدیریت می کنند.

تعقیب و حمله به طعمه

با کاهش تدریجی مقدار، گرگ ها به طعمه نزدیک تر شده و به تدریج آن را محاصره می کنند. این مکانیزم موجب حرکت از جستجوی گسترده به تمرکز روی ناحیه بهینه می شود (یزدی، ۱۴۰۱).

تنظیم پارامترها

یکی از ویژگی های کلیدی GWO استفاده از پارامترهای پویا مانند و است که به تدریج طی فرآیند بهینه سازی تغییر می کنند. این تغییرات باعث می شود الگوریتم بتواند تعادل مناسبی بین اکتشاف (جستجوی مناطق جدید) و بهره برداری (تمرکز بر ناحیه بهینه) برقرار کند (رضایی، ۱۳۹۸).

کاربردها

GWO به دلیل کارایی بالا در مسائل مختلفی استفاده شده است:

بهینه سازی مهندسی

شامل طراحی سازه ها، کنترل ربات ها و بهینه سازی شبکه های برق (رضایی، ۱۳۹۸).

مسائل داده کاوی

خوشه بندی داده ها، انتخاب ویژگی و کاهش ابعاد از کاربردهای رایج GWO در این حوزه هستند (رضایی، ۱۳۹۸).

شبکه های عصبی

تنظیم پارامترهای شبکه های عصبی و بهبود عملکرد آن ها از طریق این الگوریتم انجام شده است (رضایی، ۱۳۹۸).

توسعه ها و پیشرفت های اخیر

پژوهشگران برای بهبود عملکرد GWO، نسخه های مختلفی از آن را توسعه داده اند:

نسخه های هیبریدی

ترکیب GWO با الگوریتم های دیگر مانند PSO، GA و DE موجب افزایش توانایی الگوریتم در حل مسائل پیچیده شده است.

نسخه های چندهدفه

برای حل مسائل چندهدفه، نسخه هایی از GWO طراحی شده اند که بهینه سازی همزمان چندین هدف را ممکن می سازند.

کاربرد در یادگیری ماشین

ترکیب GWO با تکنیک های یادگیری ماشین مانند تنظیم وزن های شبکه عصبی یا انتخاب ویژگی ها، زمینه های جدیدی را برای این الگوریتم فراهم کرده است. (یزدی، ۱۴۰۱).

مزایا و محدودیت‌ها

مزایا

- سادگی و انعطاف‌پذیری: GWO به سادگی پیاده‌سازی می‌شود و برای مسائل مختلف بهینه‌سازی قابل تطبیق است.
 - قدرت جستجوی بالا: این الگوریتم به دلیل استفاده از چندین عامل (گرگ‌ها) و رهبران مختلف (آلفا، بتا و دلتا)، قادر است مناطق گسترده‌ای از فضای جستجو را بررسی کند.
 - تعادل بین اکتشاف و بهره‌برداری: استفاده از پارامترهای پویا موجب می‌شود که الگوریتم در مراحل ابتدایی جستجوی گسترده‌تری انجام داده و در مراحل پایانی به نواحی بهینه متمرکز شود. (میرجلیلی، ۲۰۱۴).
- محدودیت‌ها
- حساسیت به مقادیر اولیه پارامترها: انتخاب نادرست پارامترها می‌تواند کارایی الگوریتم را کاهش دهد.
 - گیر افتادن در بهینه‌های محلی: در برخی مسائل پیچیده، ممکن است الگوریتم به جای یافتن بهینه جهانی، در یک بهینه محلی متوقف شود. (میرجلیلی، ۲۰۱۴).

نتیجه‌گیری

الگوریتم گرگ خاکستری به عنوان یکی از روش‌های نوین فراابتکاری، توانسته است جایگاه ویژه‌ای در حل مسائل بهینه‌سازی پیدا کند. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر گیر افتادن در بهینه محلی و کاهش سرعت همگرایی در برخی مسائل پیچیده وجود دارد. پژوهش‌های آینده می‌توانند بر توسعه روش‌های ترکیبی یا استفاده از یادگیری ماشین برای بهبود عملکرد این الگوریتم متمرکز شوند. (یزدی، ۱۴۰۱).

منابع

- احمدی، م. (۱۴۰۰). بهینه‌سازی فراابتکاری و کاربردهای آن. انتشارات دانشگاه تهران.
- حسینی، ع. (۱۳۹۹). بررسی عملکرد الگوریتم گرگ خاکستری در مسائل پیچیده. فصلنامه مهندسی کامپیوتر.
- رضایی، ک. (۱۳۹۸). ترکیب الگوریتم‌های فراابتکاری: مطالعه موردی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد.
- شریفی، س. (۱۴۰۰). طراحی بهینه سازه‌های مقاوم در برابر زلزله با استفاده از الگوریتم‌های نوین. پژوهش‌های مهندسی سازه.
- کاظمی، ن. (۱۳۹۹). بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های یادگیری عمیق. فصلنامه هوش مصنوعی و داده کاوی.
- یزدی، پ. (۱۴۰۱). مدیریت منابع در شبکه‌های بی‌سیم با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان.
- میرجلیلی، س. (۲۰۱۴). معرفی الگوریتم گرگ خاکستری و کاربردهای آن. ژورنال بین‌المللی مهندسی و محاسبات.
- علی‌زاده، ف. (۱۴۰۱). بررسی و تحلیل الگوریتم گرگ خاکستری. انتشارات علمی پژوهشی.