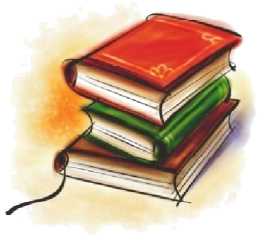


محاسبات زیستی: هوش جمعی

دانشگاه تهران - دانشکده ریاضی، آمار و علوم کامپیوتر
نیمسال اول 1397-1398



فهرست

○ مقدمه: مبانی هوش جمعی

○ کلونی مورچگان

- رفتار مورچه‌ها
- بهینه‌سازی کلونی مورچه ساده (S-ACO: Simple ACO)
- سیستم مورچه (Ant System)
- سیستم مورچه نخبه (Elitist Ant System)
- سیستم مورچه رتبه‌ای (Rank-base Ant System)
- سیستم مورچه کمینه-بیشینه (Max-Min Ant System)
- سیستم کلونی مورچه (Ant Colony System)

مقدمه ...

○ محاسبات زیستی مبتنی بر هوش جمعی (Swarm/Collective Intelligence)

- ایده از رفتار جمعی موجودات اجتماعی
 - حشرات و حیوانات: مورچه، زنبور، ماهی، پرنده‌ها و ...
 - تعامل گروهی از عامل‌ها (متحرک) با هم برای یافتن راه‌حل بهینه
 - هر موجود رفتار ساده‌ای دارد اما رفتار جمعی آنها پیچیده
 - تخصیص وظایف در کلونی مورچه‌ها بدون وجود تقسیم‌کننده و مدیریت
 - موریانه‌ها لانه‌هایی بسیار بزرگ و پیچیده می‌سازند که از درک یک موریانه خارج است



مقدمه

○ محاسبات زیستی مبتنی بر هوش جمعی

• روش‌های علامت محور (Stigmergy)

- ارتباط غیرمستقیم بین موجودات از طریق حافظه محیطی مشترک
- عدم تقلید مستقیم و استفاده از هدایت غیرمستقیم از روی علائم موجود در حافظه مشترک
- رفتار مورچه‌ها: حرکت در محیط بر اساس ترشح و تبخیر فرومون
- رفتار رقص گونه زنبورها هنگام یافتن مکان‌های غنی از گل

○ مهم‌ترین الگوریتم: بهینه‌سازی کلونی مورچگان (ACO: Ant Colony Optimization)

• روش‌های تقلید محور

- ارتباط مستقیم موجودات با هم (عدم وجود حافظه مشترک)
- استفاده از حافظه هر موجود (بهترین پاسخ محلی) و حافظه بهترین موجود جمعیت (پاسخ سراسری)
- حرکت به سوی بهترین پاسخ محلی و سراسری توسط خود و دیگران (تقلید)
- مثال: پرواز پرندگان

○ مهم‌ترین الگوریتم: بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO: Particle Swarm Optimization)

روش‌های محاسبات زیستی مبتنی بر هوش جمعی

○ روش‌های علامت محور (Stigmergy)

- بهینه‌سازی کلونی مورچگان (Ant Colony Optimization)
- بهینه‌سازی کندوی زنبور عسل (Honeybee Hive Optimization)
- کلونی زنبور مصنوعی (Artificial Bee Colony)
- بهینه‌سازی کلونی مورخانه (Termite Colony Optimization)

○ روش‌های تقلید محور

- بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization)
- الگوریتم رقابت استعماری (Imperialist Competitive Algorithm)
- الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ماهی‌ها (Artificial Fish Swarm Algorithm)
- بهینه‌سازی ازدحام گربه‌ها (Cat Swarm Optimization)
- بهینه‌سازی جستجوی گروهی (Group Search Optimization)
- الگوریتم خفاش (Bat Algorithm)

کلونی مورچگان ...

○ تاریخچه

- Marais (1872-1936) کلونی موریانه‌ها
- Grassé (1959) مطالعه روی لانه‌سازی موریانه‌ها و تعیین نوعی از ارتباط غیرمستقیم بین اعضا به نام stigmergy (معرفی مفهوم استیگمرژی)
- Deneubourg و همکاران (1990) مطالعه بر روی ارتباط فرومون به عنوان مثالی از stigmergy
- Dorigo (1992) ارائه اولین مدل الگوریتمی از رفتار جستجو گرانه مورچه برای غذا



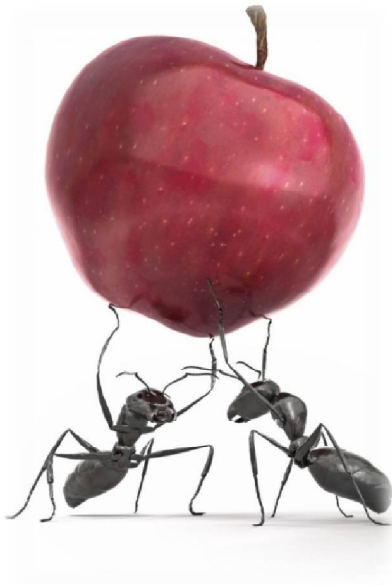
- کلونی مورچه = موفق‌ترین روش استیگمرژی
- توسعه‌های فراوان پس از 1992

○ کاربردها

- مسیریابی (کوتاه‌ترین مسیر)، خوشه‌بندی، زمان‌بندی، متن‌کاوی



کلونی مورچگان ...



○ رفتار مورچه‌ها ...

• اجتماعی بودن

○ زندگی در کلونی‌های 30 میلیونی

○ رفتار در جهت بقای کلونی

• رفتار جمعی مورچه‌ها

○ رفتار جستجو کننده غذا (جستجوگرانه)

○ تقسیم کار

○ اختصاص وظایف و همکاری بدون کنترل مرکزی و به صورت دینامیک

○ ساماندهی گورستان

○ خوشه‌بندی اجساد به منظور شکل‌دهی گورستان: ایجاد یک خوشه‌بندی پیچیده از رفتارهای ساده

○ جستجوی تصافی هر مورچه به تنهایی در هنگام برداشتن یا گذاشتن اجساد

• مراقبت از فرزندان

○ نگهداری لاروها به گونه‌ای که سنین مختلف در رینگ‌های متفاوت قرار گیرند

○ کوچک‌ترها در مرکز و بزرگ‌ترها در اطراف

کلونی مورچگان ...



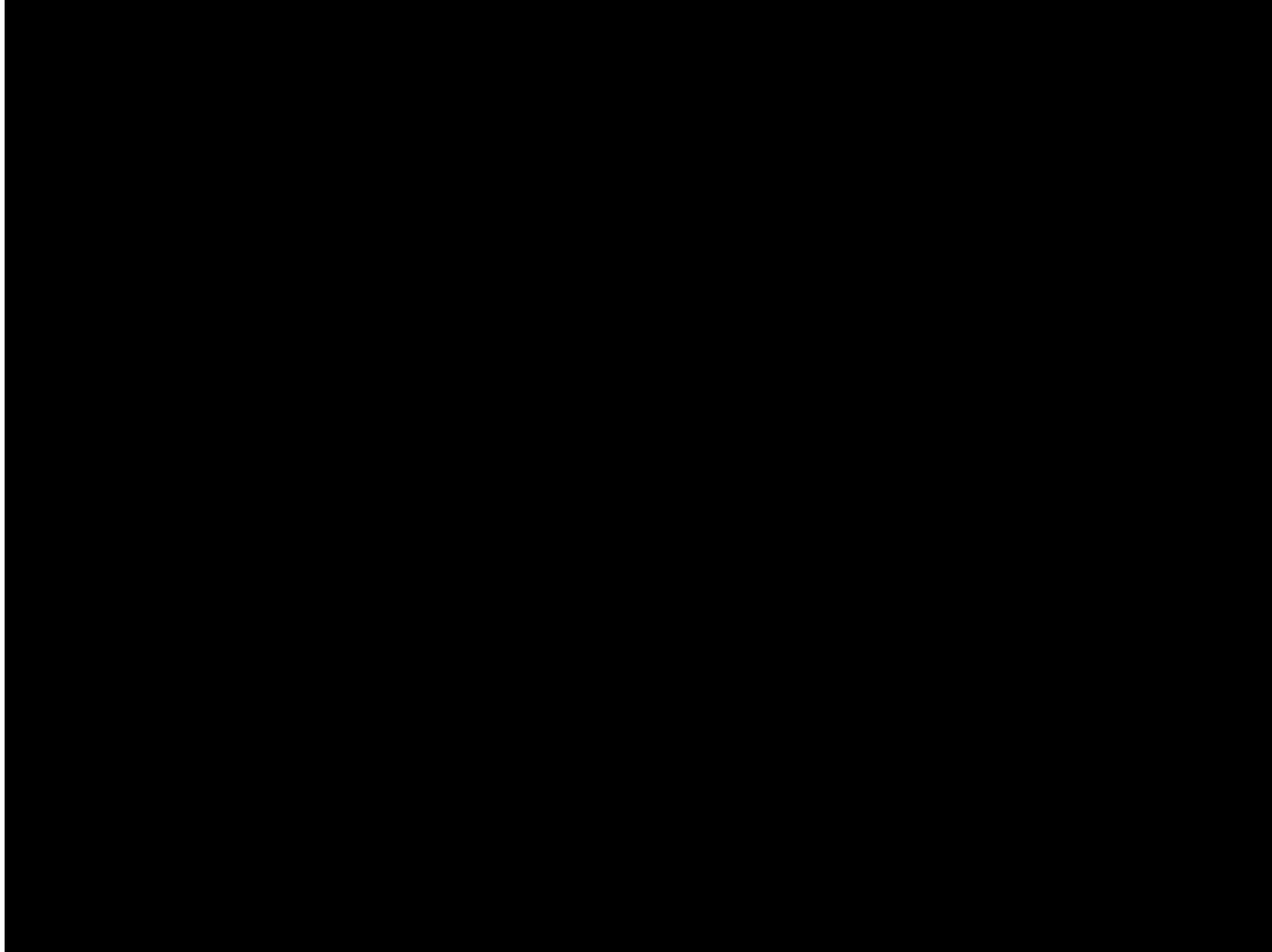
○ رفتار مورچه‌ها: جستجو ...

- موجوداتی کور، بی‌حافظه و بسیار کم‌هوش
- پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر از لانه تا غذا و برعکس
- ارتباط غیرمستقیم از طریق دنبال کردن فرومون (Pheromone)

• مطالعات اولیه روی رفتار جستجوگرانه

- الگوی اولیه براساس جستجوی تصادفی
- ساماندهی بیشتر با پیدا شدن منبع غذا
- دنبال کردن مسیرهای یکسان توسط اکثر مورچه‌ها
- دنبال کردن کوتاه‌ترین مسیر توسط اکثر مورچه‌ها؛ به جا گذاشتن فرومون در حین جستجو
- مسیرهای با غلظت فرومون بیشتر ← احتمال انتخاب شدن بالاتر
- Stigmergy: ارتباط غیر مستقیم مورچه‌ها در تطبیق با محیط با به جا گذاری فرومون برای تحت تاثیر قرار دادن رفتار دیگر اعضا
- تبخیر فرومون در طول زمان ← احتمال کشف مسیر جدید

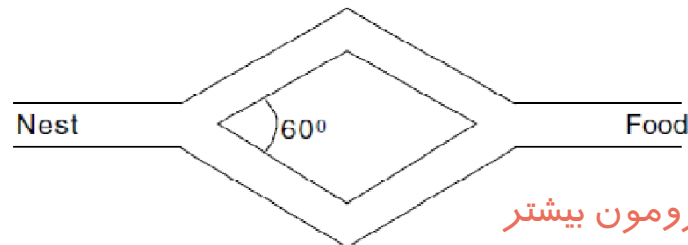
کلونی مورچگان ...



کلونی مورچگان ...

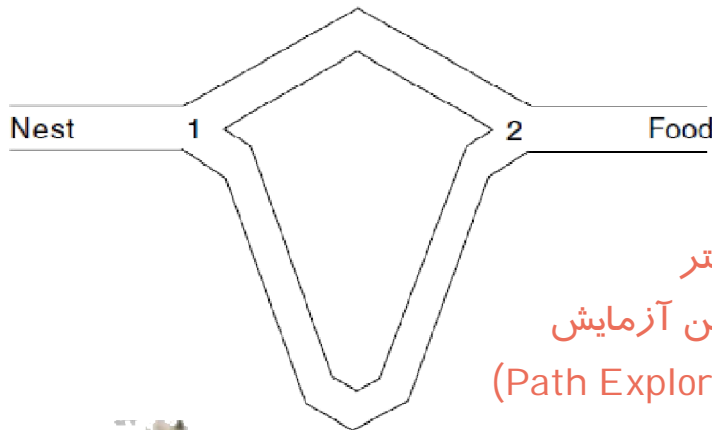
○ رفتار مورچه‌ها: آزمایش‌های پل ...

- توسط Goss (و Deneubourg و همکاران) در 1989



• دو مسیر با طول یکسان

- حرکت اولیه به صورت تصادفی از یکی از دو مسیر
- در پایان انتخاب یکی از مسیرها: رفت و برگشت بیشتر = فرمون بیشتر
- تعداد اندکی در یکی از مسیرها بیشتر از مسیر دیگر است که در بلند مدت موچه‌ها را در آن نگه می‌دارد
- مسیر دیگر صفر نخواهد شد



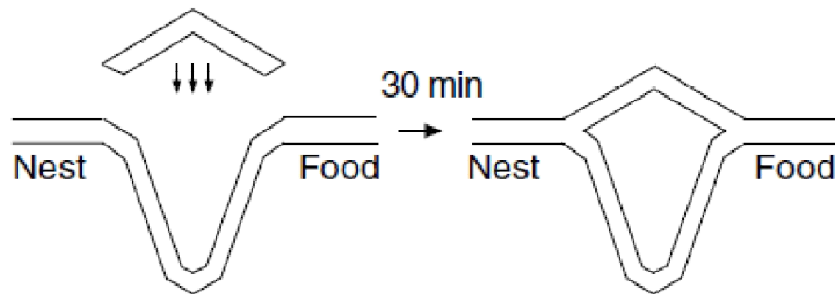
• دو مسیر با طول متفاوت (یکی دو برابر دیگری)

- حرکت اولیه به صورت تصادفی از یکی از دو مسیر
- مسیر کوتاه‌تر رفت و برگشتی بیشتری دارد = فرمون بیشتر
- در نهایت، مسیر کوتاه‌تر انتخاب می‌شود: تکرار چند باره این آزمایش
- هنوز درصد کمی از مسیر طولانی حرکت می‌کنند (Path Exploration)



کلونی مورچگان ...

○ رفتار مورچه‌ها: آزمایش‌های پل



• آزمایش سوم: اضافه کردن مسیر کوتاه‌تر

- 30 دقیقه بعد از همگرایی به یک مسیر بلند، یک مسیر کوتاه‌تر ایجاد می‌کنیم
- تعدادی به صورت تصادفی در مسیر کوتاه قرار می‌گیرند اما ادامه حرکت در مسیر بلند خواهد بود

○ غلظت زیاد فرومون روی مسیر بلند

○ تبخیر آرام فرومون

○ سرعت تبخیر فرومون = یکی از پارامترهای مهم

○ تبخیر بیشتر = عدم حفظ مسیر بهینه

○ تبخیر کم = گیر افتادن در بهینه محلی

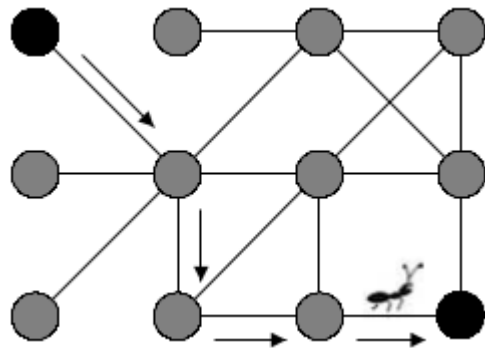


کلونی مورچگان ...

○ مورچه مصنوعی

- شباهت مورچه‌های واقعی و مورچه‌های مصنوعی

- مجموعه‌ای از اعضای همکار
- ردپای فرومونی برای ارتباط stigmergy
- دنباله‌ای از حرکات محلی برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر
- سیاست تصمیم‌گیری تصادفی با استفاده از اطلاعات محلی



- تفاوت مورچه‌های واقعی و مورچه‌های مصنوعی

- حالت درونی: حافظه‌ای از فعالیت‌های قبلی مورچه
- فرومون مصنوعی: تابعی از کیفیت پاسخ پیدا شده
- موانع ساختگی: تغییر دادن جزئیات مسأله برای بررسی الگوریتم و رسیدن به جواب‌های متنوع



کلونی مورچگان: الگوریتم ...

- هدف: الگوریتمی برای یافتن مسیر بهینه در گراف $G=(N, A)$
 - N = تعداد گره‌ها و A = تعداد یال‌ها

○ وجود الگوریتم‌های مختلف

- بهینه‌سازی کلونی مورچه ساده (S-ACO: Simple ACO)
- سیستم مورچه (Ant System)
- سیستم مورچه نخبه (Elitist Ant System)
- سیستم مورچه رتبه‌ای (Rank-base Ant System)
- سیستم مورچه کمینه-بیشینه (Max-Min Ant System)
- سیستم کلونی مورچه (Ant Colony System)
- سیستم مورچه Q (Q-learning Ant Colony System)
- سیستم مورچه سریع (Fast Ant System)



کلونی مورچگان: الگوریتم S-ACO ...

- پیشرو (Forward): حرکت مورچه از لانه به طرف غذا
 - عدم گذاشتن فرومون در این حالت: جلوگیری از ایجاد حلقه
- پسرو (Backward): حرکت (بازگشت) مورچه از محل غذا به لانه
 - نیاز به حافظه برای نگه داشتن مسیر رفت و جلوگیری از حلقه
 - گذاشتن فرومون در برگشت
- به روز کردن فرومون: بر اساس برآزش مسیر
 - گذاشتن فرومون بیشتر بر روی مسیرهای بهتر (کوتاه تر)
 - برای مورچه های طبیعی: گذاشتن فرومون بیشتر در برگشت از منبعی با غذای زیاد
 - برای مورچه kام و یال بین دو گره a و b

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau(k)$$

تابعی از برآزش مسیر
- در ابتدا فرومون همه یال ها مقدار ثابتی است (مثلاً 0.5)

کلونی مورچگان: الگوریتم S-ACO ...

○ انتخاب مسیر: بر اساس مقدار فرومون

- وقتی مورچه k در گره i قرار دارد، گره i را با احتمال زیر انتخاب می کند

$$p_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^{\alpha}}{\sum_{l \in N_i(k)} \tau_{il}^{\alpha}} & \text{if } j \in N_i(k) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

همسایه های مورچه k در گره i =
گره های متصل به گره i به جز
گره های که مورچه از آن آمده است

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij}$$

○ تبخیر فرومون: کاهش میزان فرومون به مرور زمان

پارامتر: مقدار در بازه $(0, 1]$

- کاهش اثر راه حل های غیربهبوده و ضعیف
- محدود کردن سقف مقدار فرومون
- اعمال بعد از عبور مورچه k از گره جاری به گره بعدی

کلونی مورچگان: الگوریتم S-ACO ...

○ مراحل الگوریتم

- مقداردهی تصادفی به $\tau_{ij}(0)$ (مقادیر فرومون روی یال‌ها)

$$p_{ij}(k) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha}{\sum_{l \in N_i(k)} \tau_{il}^\alpha} & \text{if } j \in N_i(k) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

- تکرار مراحل زیر برای همه m مورچه
 - ساخت مسیر $x(k,t)$ برای مورچه k ام با توجه به احتمال‌های $p_{ij}(k)$
 - محاسبه برازش مسیر ساخته شده: $f(x(k,t))$

- تبخیر فرومون در همه یال‌ها $\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}$

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta\tau(k)$$

- تکرار مرحله زیر برای همه m مورچه
 - افزایش مقدار فرومون یال‌های مسیر ساخته شده توسط مورچه k ام به صورت $\Delta\tau(k) = 1/f(x(k,t))$ در اینجا

- تکرار الگوریتم در صورت عدم ارضای شرط توقف

کلونی مورچگان: الگوریتم S-ACO ...

- روش کلونی مورچه ساده برای حل گراف‌های ساده خوب کار می‌کند
 - برای گراف‌های پیچیده به مقدار پارامترها وابسته می‌شود

○ نقش پارامترها

- تعداد مورچه‌ها (m)

- تعداد زیاد منجر به واگرایی می‌شود و تعداد کم منجر به کاهش قابلیت پویایی می‌شود
- مقدار نمونه: برابر با تعداد گره‌های راه‌حل = تعداد شهرها در فروشنده دوره‌گرد

- تبخیر در گراف‌های پیچیده بسیار موثر است

- اگر $\rho=0$ باشد (عدم تبخیر) = عدم همگرایی
- اگر ρ بزرگ باشد، الگوریتم به بهینه‌های محلی همگرا می‌شود

- مقدار α در انتخاب مسیر

- مقدار بزرگ در مسائل پیچیده منجر به واگرایی می‌شود



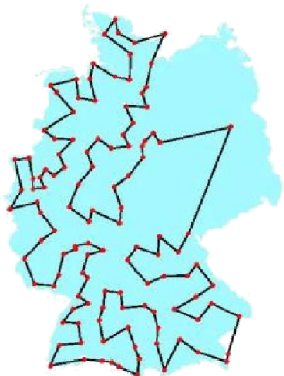
کلونی مورچگان: الگوریتم S-ACO

○ مساله فروشنده دوره گرد (Travelling Salesman Problem)

- یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای یک فروشنده با عبور از n شهر
- از تمامی شهرها دقیقاً یک بار بگذرد و به شهر اول برگردد
- جزو مسائل NP-Hard
- تعداد کل راه‌حل‌ها برای n شهر $= 0.5(n-1)!$

○ حل با S-ACO

- هر مورچه به صورت تصادفی از یک شهر شروع می‌کند
- در اضافه کردن گره جدید در نظر می‌گیرد که گره قبلاً بازدید نشده باشد
- به روز کردن فرومون متناسب با عکس فاصله در تور $\tau_{ij} \approx 1/d_{ij}$



کلونی مورچگان: الگوریتم AS ...

○ الگوریتم سیستم مورچه (Ant System)

- ارائه توسط دوریگو (Dorigo) در 1992

- مقداردهی اولیه فرومون: بیشتر از مقداری که یک مورچه می گذارد

- مقدار فرومون اولیه: $\tau_0 = m/d^{nn}$ ، که m تعداد مورچه ها و d^{nn} طول تور تولید شده با روش نزدیکترین همسایه است

- مقدار اولیه خیلی کم: پس از به روز کردن اولین مسیرها، سایر مسیرها دنبال نمی شود

- مقدار اولیه خیلی زیاد: تکرارهای بی هدف زیاد تا زمان تبخیر فرومون

- تبخیر فرومون

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}$$

- بعد از اینکه همه مورچه ها تور را ساختند

پارامتر: مقدار در بازه $(0, 1]$

- فراموش کردن مسیرهای نادرست

کلوئی مورچگان: الگوریتم AS ...

○ به روز کردن فرومون

- بعد از اینکه همه مورچه ها تور را ساختند

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}(k)$$

مقدار فرومونی که مورچه k بر روی
یال هایی که از آن عبور کرده قرار می دهد

$$\Delta \tau_{ij}(k) = \begin{cases} 1/d(k) & \langle i, j \rangle \in T(k) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

طول تور (همه یال ها) ساخته شده
توسط مورچه k ام

تور ایجاد شده توسط مورچه k ام

- یال هایی که در تعداد تورهای بیشتری قرار دارند (احتمالاً بخشی از مسیر کوتاه هستند) و فرومون بیشتری دریافت می کنند

کلونی مورچگان: الگوریتم AS ...

○ انتخاب مسیر: قانون نسبت تصادفی (Random Proportional)

- احتمال انتخاب گره j توسط مورچه k وقتی در گره i قرار دارد
- بر اساس مقدار فرومون و پارامتر اکتشافی

$$p_{ij}(k) = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{l \in N_i(k)} \tau_{il}^{\alpha} \eta_{il}^{\beta}} \text{ if } j \in N_i(k)$$

گره‌های همسایه در گره i برای مورچه k (که دیده نشده‌اند)

پارامتر مکاشفه‌ای، وابسته به مساله برای TSP: برابر با $1/d_{ij}$

- α و β : پارامترهای مصالحه بین دنباله فرومونی و اطلاعات مکاشفه‌ای

○ $\alpha=0$ یعنی انتخاب نزدیک‌ترین شهر

○ $\alpha>1$: موقعیت رکود (Stagnation): تولید یک تور توسط همه مورچه‌ها

○ $\beta=0$ به معنای عدم استفاده از اطلاعات مکاشفه‌ای است و تنها بر اساس فرومون انتخاب صورت می‌گیرد

کلونی مورچگان: الگوریتم AS

○ مراحل الگوریتم

- مقداردهی تصادفی به پارامترها (فرمون و پارامترهای α و β)

$$p_{ij}(k) = \frac{\tau_{ij}^{\alpha} \eta_{ij}^{\beta}}{\sum_{l \in N_i(k)} \tau_{il}^{\alpha} \eta_{il}^{\beta}} \text{ if } j \in N_i(k)$$

- تکرار مرحله زیر برای همه m مورچه

○ ساخت مسیر $x(k,t)$ برای مورچه k ام با توجه به احتمالهای $p_{ij}(k)$

- تکرار مراحل زیر برای همه m مورچه

○ تبخیر فرمون در همه یالها $\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}$

○ افزایش مقدار فرمون یالهای مسیر ساخته شده توسط مورچه k ام

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}(k)$$

$$\Delta \tau_{ij}(k) = \begin{cases} 1/d(k) & \langle i, j \rangle \in T(k) \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

- تکرار الگوریتم در صورت عدم ارضای شرط توقف

کلونی مورچگان: الگوریتم EAS

سیستم مورچه نخبه (Elitist Ant System)

- بهبود روش AS با توجه بیشتر به یال‌های متعلق به بهترین تور پیدا شده از ابتدا تاکنون
- توجه بیشتر = فرومون گذاری بیشتر

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}(k) + e\Delta\tau_{ij}^{bs}$$

$$\Delta\tau_{ij}^{bs} = \begin{cases} 1/d^{bs} & \langle i, j \rangle \in T^{bs} \\ 0 & \text{else} \end{cases}$$

بهترین تور(ها)

طول تور ساخته شده توسط بهترین مورچه (ها)

- e = پارامتر کنترلی که بیانگر اهمیت تورهای برتر است

کلونی مورچگان: الگوریتم RAS

سیستم مورچه رتبه‌ای (Rank-based Ant System)

- فرومون‌ریزی هر مورچه متناسب با برازش نسبی مسیر یافته شده توسط آن مورچه است
- مورچه‌ای که بهترین مسیر را یافته برازش بیشتری دارد و فرومون بیشتری روی مسیر خود می‌گذارد

• الگوریتم

- رتبه‌بندی مورچه‌ها بر اساس طول تور تولیدی آنها
- انتخاب بهترین مورچه (در کل تکرارها) و $W-1$ بهترین مورچه در تکرار جاری
- وزن‌دهی مقدار فرومون هر مورچه بر اساس رتبه آن (r)
- بهترین تور با وزن W و سایر تورها به ترتیب با وزن $\max(0, W-r)$

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \sum_{r=1}^{w-1} (w-r) \Delta \tau_{ij}^r(k) + w \Delta \tau_{ij}^{bs}$$

$$\Delta \tau_{ij}^{bs} = 1 / d^{bs}$$

$$\Delta \tau_{ij}^r = 1 / d^r$$

تور با کم‌ترین فاصله

کلونی مورچگان: الگوریتم MMAS

سیستم مورچه کمینه-بیشینه (Max-Min Ant System)

- رفع مشکل رکود زودهنگام

- مسیرهای یکسان برای همه مورچه‌ها
- تمرکز سریع روی مسیرهای با فرومون بیشتر

- چهار تغییر به نسبت AS

$$\tau_{ij} = \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{best}$$

- تنها بهترین مورچه اجازه فرومون گذاری دارد

- بهترین: از ابتدا تاکنون یا برای تکرار جاری

- ممکن است ایجاد رکود کند

- دامنه فرومون را به بازه $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ محدود می‌کند

- مقداردهی اولیه با بیشترین مقدار فرومون و تبخیر کم

- مقداردهی مجدد فرومون برای تعدادی تکرار مشخص در حالتی که به رکود می‌رسد و تور بهتری تولید نمی‌شود

کلونی مورچگان: الگوریتم ACS ...

سیستم کلونی مورچه (Ant Colony System)

- سه تفاوت با AS

- اتکا به تجربیات جستجوی خود در انتخاب مسیر
- فرمون گذاری و تبخیر آن تنها برای یال های متعلق به بهترین تور
- برداشتن مقداری فرمون از روی یال های مسیر حرکت برای افزایش قابلیت پویش

- انتخاب مسیر: قانون نسبت شبه تصادفی (Pseudorandom Proportional)

- انتخاب گره از توسط مورچه k وقتی در گره i قرار دارد

$$j = \begin{cases} \arg \max_{l \in N_i(k)} \{ \tau_{il} \eta_{il}^\beta \} & \text{if } q \leq q_0 \\ J : p_{ij}(k) = \frac{\tau_{ij} \eta_{ij}^\beta}{\sum_{l \in N_i(k)} \tau_{il} \eta_{il}^\beta} & \text{else} \end{cases}$$

- q = متغیری تصادفی با توزیع یکنواخت

- q_0 = پارامتری قابل تنظیم

بهترین انتخاب با احتمال q_0

سایر انتخاب ها

- انتخاب بهترین مسیر ممکن با احتمال q_0 بر اساس دانش قبلی و کاوش یال های دیگر با احتمال $(1-q_0)$

کلونی مورچگان: الگوریتم ACS ...

○ فرومون‌گذاری و تبخیر (هم‌زمان) عمومی

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^{bs}$$

- تنها توسط بهترین مورچه در هر تکرار
- بهترین مورچه-تکرار: مناسب برای مسائل کوچک (کمتر از 100 شهر در مساله فروشنده دوره گرد)
- بهترین مورچه تاکنون: مناسب برای مسائل بزرگ

○ فرومون‌گذاری و تبخیر (هم‌زمان) محلی

$$\tau_{ij} = (1 - \xi)\tau_{ij} + \xi\tau_0$$

- اعمال در زمان عبور مورچه‌ها از یک یال

پارامتر با مقدار حدود 0.1

پارامتر: مشابه مقدار اولیه فرومون
مقدار: $1/nd^{nn}$ (n=تعداد شهرها در TSP)

- کاهش فرومون: توجه کمتر سایر مورچه‌ها به مسیر = پویش بیشتر

○ تفاوت عملکرد ACS در اجرای موازی و متوالی

- موازی: همه مورچه‌ها با هم تورهای خود را می‌سازند (حرکت هم‌زمان از یک گره به گره بعد)
- متوالی: بعد از اینکه یک مورچه کل تور خود را ساخت، مورچه دیگر شروع می‌کند

کلونی مورچگان: الگوریتم ACS

○ ارتباط بین MMAS و ACS

- محدود بودن بازه مقادیر مجاز برای فرومون

- در ACS داریم: $\tau_0 \leq \tau_{ij} \leq 1/d^{bs}$

○ استفاده از لیست انتخاب در ACS

- لیستی که شامل تعدادی انتخاب است و بر اساس اطلاعات مساله بدست می آید
- در فروشنده دوره گرد: لیست انتخاب در شهر i ام بیانگر تعداد (محدودی) شهر است که به شهر i نزدیک تر هستند
- این لیست را می توان قبل از شروع حل مساله ساخت و تا پایان ثابت نگه داشت

- افزایش سرعت در یافتن راه حل ها و افزایش کیفیت پاسخ ها