AI Planning Project Report

Hosein Hassani 98301239

Mohammad Amin Banayeean Zade 98208835

1. **مقدمه**

روش fast forward که پیش از این در درس با آن آشنا شدیم، به عنوان یکی از الگوریتم‌های موفق در زمینه‌ برنامه‌ریزی شناخته می‌شود. این برنامه‌ریز توانست در مسابقات AIPS-2000 با اختلاف زیادی از سایر رقبای خود پیشی بگیرد و از این طریق به شهرت زیادی دست یافت[1]. این برنامه‌ریز مبتنی بر روش جستجوی فضای حالت و به صورت جلورو عمل می‌کند اما آن چیزی که این برنامه ریز را متفاوت ساخته است، استفاده از تابع ابتکاری مبتنی بر Graph Plan ریلکس شده است. این تابع ابتکاری به منظور هرس کردن و اولویت دهی به نودهای درخت جستجو استفاده می‌شود. در واقع این برنامه ریز با ارائه یک تابع ابتکاری جدید و همچنین هرس کردن درخت جستجو با کمک مفهوم helpful actions، توانسته بهبود بسیار زیادی ایجاد نماید.

ما در این پروژه قصد داریم تا این برنامه‌ریز را پیاده‌سازی نموده و ضمن تحلیل کارایی آن، سعی در بهبود این روش با ارئه‌های ایده‌های جدید خواهیم داشت. برای این منظور در قسمت اول این گزارش، به توضیح جزئیات ساختار پیاده‌سازی شده با کمک زبان برنامه نویسی پایتون می‌پردازیم. در این پروژه ما از دو شیوه نمایشی مناسب به منظور ارائه جواب برنامه‌ریز بهره می‌بریم (نمایش متنی و تصویری). در قسمت دوم گزارش، ضمن معرفی دقیق‌تر این دو نحوه نمایش، نتایج اجرای ورژن‌های مختلف الگوریتم FF روی بنچمارک‌های طراحی شده را بیان می‌کنیم. همچنین به منظور انجام یک ارزیابی مناسب، در بخش سوم، دو برنامه‌ریز جستجوی جلورو و عقب رو را پیاده‌سازی کرده و با نتایج حاصل از FF مقایسه می‌کنیم. ما برای مقایسه میان برنامه‌ریزها، از دو معیار «طول برنامه به دست آمده» و «مدت زمان اجرای الگوریتم» استفاده می‌کنیم. همچنین توانایی الگوریتم در «یافتن پاسخ مناسب بدون رسیدن به محدودیت‌های اجرایی» از دیگر معیارهای ارائه شده در این بخش است. در بخش بعدی، تمرکز ما به بررسی اثر هر یک از عوامل مشارکت کننده در ساخت FF معطوف خواهد شد. به عبارت دیگر در این بخش میزان تاثیر تابع ابتکاری معرفی شده و عملیات هرس مورد بررسی قرار می‌گیرند تا نقاط قوت این تابع را روشن کنند.

لازم به ذکر است که مشارکت اعضا در انجام این پروژه مطابق جدول زیر است:

|  |  |
| --- | --- |
| وظیفه | مسئول |
| طراحی ساختار و پیاده‌سازی چارچوب‌ها | بنائیان زاده |
| دریافت اطلاعات مسئله از ورودی | حسنی |
| پیاده‌سازی تابع ابتکاری | بنائیان زاده |
| ورژ‌ن‌های مختلف برنامه ریز FF | حسنی |
| برنامه‌ریز‌های جلورو و عقب رو | بنائیان‌زاده |
| تحلیل کارایی FF | حسنی |
| پیاده سازی ماژول گرافیکی | بنائیان زاده |
| تهیه‌ی دیاگرام‌ها و تصاویر | مشترک |
| تدوین و نگارش گزارش | مشترک |

1. **جزئیات پیاده‌سازی و بررسی چارچوب کد**

ما سعی کرده‌ایم تا در انجام این پروژه با کمک گرفتن از اصول برنامه‌نویسی شیء گرا، یک ساختار و چارچوب منظم به منظور حل مسئله برنامه‌ریزی ارائه کنیم. پایبندی به این مسئله به ما اجازه داد تا یک محیط کارا به منظور آزمودن الگوریتم‌های مختلف برنامه‌ریزی را توسعه دهیم. در بستر ارائه شده، عیب‌یابی به شدت ساده است و خوانایی کد بسیار بالا رفته است.

در این قسمت از گزارش، کلاس‌های پیاده سازی شده در کد را به صورت مفصل ذکر می‌کنیم. همچنین توابع پیاده سازی شده در هر بخش و انتظاراتی که از آن توابع می‌رود را ذیل یک جدول ارائه می‌دهیم:

1. کلاس Proposition:

این کلاس پایه‌ای ترین مفهوم پیاده‌سازی شده در این پروژه می‌باشد. در واقع این کلاس حاوی جزئیات مورد نیاز برای مدل‌سازی یک گزاره در محیط است. از آنجایی که برنامه‌ریز FF یک برنامه‌ریز Ground می‌باشد، ما سعی کرده‌ایم تا بیشتر از فرم نمایش Set-Theoritic مسائل بهره ببریم. لذا همانطور که در قسمت‌های بعدی نیز توضیح می‌دهیم، برای توصیف یک State کافیست مجموعه گزاره‌های صحیح در آن را نگه‌داری نماییم.

در دو جدول زیر، متغیرهای به کار گرفته شده و توابع پیاده‌سازی شده ذیل این کلاس را معرفی می‌کنیم:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| متغیرها | | |
| نام متغیر | وظیفه | مثال |
| name | نشان دهنده نام گزاره | On |
| vars | نشان دهنده متغیرهای موجود در گزاره | [“a”,”b”] |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| توابع | | |
| نام تابع | وظیفه | ورودی |
| substitute | جایگزین کردن متغیرهای گزاره داده شده با متغیرهای دلخواه | نگاشتی شامل نقشه تغییر متغیرهای فعلی به متغیر‌های جدید |

گفتنی است ما در این پروژه به کرات از ویژگی‌های برجسته زبان پایتون برای بهبود کیفیت استفاده کرده‌ایم. به عنوان مثال، یکی از موارد انجام شده در این پروژه، بازنویسی توابع داخلی \_\_eq\_\_، \_\_repr\_\_ و \_\_hash\_\_ برای کلاس‌های پیاده‌سازی شده می‌باشد. وظیفه این سه تابع به ترتیب عبارت است از: «ایجاد امکان مقایسه برای بررسی تساوی بین دو گزاره»، «ارائه یک شیوه نمایش یکتا برای هر گزاره» و «اعمال یک مبنای hash کردن مناسب به منظور وارد کردن گزاره‌ها به مجموعه».

1. کلاس Action:

از این کلاس به منظور مدل‌سازی کنش‌های مسئله استفاده شده است. برای این منظور در هر کنش مجموعه پیش‌شرط‌های مثبت و منفی به همراه اثرات مثبت و منفی در نظر گرفته شده است. این مجموعه‌ها هر کدام از مجموعه گزاره‌هایی تشکیل شده‌اند که در بخش قبل توضیح داده شد.

در جدول زیر جزئیات پیاده‌سازی دیده می‌شود:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| متغیرها | | |
| نام متغیر | وظیفه | مثال |
| Name | نشان دهنده نام کنش | Unstack |
| pre\_pos | مجموعه شامل پیش‌شرط‌های مثبت یک کنش | On(a,b)  Clear(a)  Hand\_empty |
| pre\_neg | نشان دهنده پیش‌شرط‌های منفی یک کنش | - |
| eff\_pos | نشان دهنده اثرات مثبت یک کنش | Clear (b) |
| eff\_neg | نشان دهنده اثرات منفی یک کنش | On(a,b)  Clear(a)  hand-empty |
| variables | نام متغیرهای به کار رفته در کنش | “a” , “b” |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| توابع | | |
| نام تابع | وظیفه | ورودی |
| substitute\_and\_copy | جایگزین کردن متغیرهای کنش داده شده با متغیرهای دلخواه | نگاشتی شامل نقشه تغییر متغیرهای فعلی به متغیر‌های جدید |
| relax\_action | ساده‌سازی اکشن با حذف پیش‌شرط‌ها و اثرات منفی | - |
| get\_vars | استخراج نام متغیرهای به کار رفته در کنش | - |
| get\_short\_name | دریافت خلاصه‌ای از نام کنش | - |

1. کلاس State:

حالت‌های موجود در یک مسئله برنامه‌ریزی توسط این کلاس مدل می‌شوند. در واقع یک حالت عبارت است از مجموعه‌ای از گزاره‌ها که درباره محیط اطلاعاتی ارائه می‌کنند. توجه کنید که ما در پیاده‌سازی خود «فرض دنیای بسته» را رعایت کرده‌ایم. لذا گزاره‌هایی که در توصیف State نمی‌آیند، خود به خود نادرست خواهند بود.

جدول راهنمای موارد پیاده سازی شده در ادامه آمده است:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| متغیرها | | |
| نام متغیر | وظیفه | مثال |
| propositions | مجموعه‌ای از گزاره‌هایی که در این state برقرار هستند | On(a,b)  Clear(a)  Hand\_empty  On-table(b) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| توابع | | |
| نام تابع | وظیفه | ورودی |
| isGoal | با دریافت توصیف حالت هدف، بررسی می‌کند که state فعلی در تعریف هدف صدق می‌کند یا خیر | یک حالت هدف از جنس Goal |
| relax\_action | ساده‌سازی اکشن با حذف پیش‌شرط‌ها و اثرات منفی | - |
| get\_vars | استخراج نام متغیرهای به کار رفته در حالت | - |
| isAppliable | با دریافت یک کنش بررسی می‌کند که آیا آن کنش در حالت فعلی قابل اعمال است یا خیر | یک کنش |
| apply\_unified\_action | با دریافت یک کنش، آن را روی حالت فعلی اعمال می‌کند و حالت جدید را تولید می‌کند | یک کنش که قابل اعمال کردن در حالت فعلی باشد |
| get\_all\_unifications | nification های مختلف یک اکشن که در حالت فعلی قابل اعمال هستند را تولید می‌کند | یک کنش |
| get\_all\_possible\_actions | با دریافت یک مجموعه lifted از کنش‌ها، تمامی اکشن‌های Groundای که قابل اعمال در حالت فعلی هستند را تولید می‌نماید | یک مجموعه از کنش‌ها |

مجدداً متذکر می‌شویم که اکشن‌ها به صورت lifted نگه داری می‌شوند اما در حین ساخت plan، تمامی unification‌های قابل اعمال بر روی یک حالت خاص در همان لحظه استخراج می‌شود و تمامی نسخه‌های Ground کنش‌های قابل اعمال بازگردانی می‌شود.

1. کلاس Goal:

این کلاس مدل کننده یک هدف می‌باشد. طبیعتاً در یک هدف، هم گزاره‌های مثبت و هم گزاره‌های منفی می‌توانند وجود داشته باشند.

به منظور پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی عقب رو، قسمت‌هایی به تعریف هدف اضافه شده است که در جداول زیر قابل مشاهده است:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| متغیرها | | |
| نام متغیر | وظیفه | مثال |
| propos\_pos | این مجموعه دربرگیرنده‌ گزاره‌‌هایی است که باید در حالت هدف برقرار باشند | On(a,b)  Clear(a) |
| propos\_neg | این مجموعه دربرگیرنده‌ گزاره‌‌هایی است که نباید در حالت هدف برقرار باشند | On-table(b) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| توابع | | |
| نام تابع | وظیفه | ورودی |
| get\_vars | استخراج نام متغیرهای به کار رفته در حالت | - |
| isBackwardAppliable | با دریافت یک کنش بررسی می‌کند که آیا عکس آن کنش بر هدف فعلی قابل اعمال است یا خیر | یک کنش |
| apply\_inverse\_unified\_action | با دریافت یک کنش، عکس آن را روی هدف فعلی اعمال می‌کند و هدف جدید را تولید می‌کند | یک کنش که عکس آن قابل اعمال کردن در goal فعلی باشد |
| get\_all\_backward\_unifications | unification های مختلف یک اکشن که در عکس آن‌ها در هدف فعلی قابل اعمال هست را تولید می‌کند | یک کنش |
| get\_all\_possible\_backward\_actions | با دریافت یک مجموعه lifted از کنش‌ها، تمامی اکشن‌های Groundای که عکس آن‌ها قابل اعمال در goal فعلی هستند را تولید می‌نماید | یک مجموعه از کنش‌ها |

1. کلاس Graphlayer:

این کلاس مدل کننده یک لایه گزاره‌ای در الگوریتم Graph plan می‌باشد. توجه کنید که تعریف این کلاس خیلی شبیه به پیاده‌سازی State می‌باشد لذا از آن کلاس ارث بری کرده است. تنها تفاوت جدی Graphlayer با State، وجود گزاره‌های منفی در توصیف آن است. از آن‌جایی که مفهوم مطرح شده در اکثر توابع مربوط به این کلاس با کلاس پدر خود مشترک می‌باشد، از ذکر مجدد آن‌ها خودداری می‌کنیم.

کلاس‌های معرفی شده در بالا، کلاس‌های پایه‌ای هستند که در قلب طراحی ما قرار دارد. به جز این کلاس‌ها، ماژول‌های زیر نیز پیاده‌سازی شده‌اند که آن‌ها را شرح می‌دهیم:

* ماژول GraphPlan : این ماژول حاوی کدهای پیاده‌سازی الگوریتم GraphPlan ریلکس شده می‌باشد. از این ماژول به منظور محاسبه تابع ابتکاری در برنامه‌ریز FF استفاده شده است.
* کلاس plan: این کلاس در واقع مجموعه‌ای از اکشن‌ها را در بر می‌گیرد که در کنار هم یک برنامه خطی را تشکیل می‌دهند. گفتنی است که الگوریتم سرچ جلورو اکشن‌ها را از ابتدا به سمت انتهای پلن تکمیل می‌کند در حالی که در عقب‌رو خلاف این مسئله اتفاق می‌افتد. برای هر دو این حالت‌ها توابع متناظری در این کلاس قرار داده شده است.
* ماژول Graphic: این ماژول یک ابزار نمایشی برای دامنه مکعب‌ها در اختیار ما قرار می‌دهد. توضیحات مفصل‌تر این ماژول و نمونه خروجی آن در بخش‌های بعدی گزارش خواهد آمد.
* ماژول Planner : برنامه‌ریزهای پیاده سازی شده در این پروژه (از جمله FF، جلورو و عقب‌رو) در این فایل قرار داده شده‌اند. در ادامه هر یک از این سه برنامه‌ریز را شرح می‌دهیم:
  + برنامه‌ریز جلو رو: این برنامه‌ریز ساده‌ترین الگوریتم جستجوی رو به جلو است که در فصل 4 کتاب معرفی شده است. ما در این الگوریتم مکانیزم جلوگیری از حلقه را وارد کرده‌ایم تا از بروز حلقه‌های بی‌نهایت جلوگیری کنیم. توجه کنید که در صورت نامحدود بودن زمان و حافظه این الگوریتم کامل است اما از آن‌جایی که چنین فرضی در عمل شدنی نیست، ما یک کران بالا برای عمق برای این الگوریتم در نظر گرفته‌ایم. به عبارت دیگر طول برنامه‌های مجاز در این برنامه‌ریز به این عدد محدود خواهد شد.
  + برنامه‌ریز عقب رو: این الگوریتم دقیقاً همان الگوریتم رو به عقبی است که در فصل 4 کتاب آمده است. مجدداً برای این برنامه‌ریز هم یک کران بالا برای محدود کردن طول plan در نظر گرفته شده است.
  + **برنامه ریز FF**: برای این برنامه‌ریز چندین ورژن مختلف پیاده سازی شد که در آن نسخه‌های **naïve\_bestchild، modified\_enforced، probabilistic\_modified\_enforced** ابتکار اعضای گروه بوده است:
    - ورژن **naïve\_greedy:** در این نسخه طبق خواسته‌ی صورت پروژه از ورژن ساده‌ شده‌ی تپه‌نوردی استفاده شده است. به این صورت که برای جست‌وجو، مقدار هیورستیک صرفا تا یک سطح بعد محاسبه می‌شود و بین کنش‌های helpful اولین کنشی که منجر به رسیدن به مقداری هیورستیک کمتر از گره ریشه بشود، به عنوان حالت بعدی در نظر گرفته می‌شود. اگر تمام فرزندان دارای هیورستیک بزرگتر از ریشه باشند روش در مینیمم موضوعی گیر کرده و به جواب نمی‌رسد.
    - ورژن **naïve\_bestchild**: مشکل روش قبل در این است که بعد از گیر کردن در مینیمم موضعی دیگر به جست‌وجو ادامه نمی‌دهد. برای رفع این مشکل از چندین ایده‌ی ساده استفاده شده است که در عمل کارایی خوبی دارد.  
      در این روش هم مانند روش قبل جست و جو فقط معطوف به فرزندان گره ریشه بوده و به سطوح پایین‌تر ادامه پیدا نمی‌کند. اما بر خلاف روش قبل، در هر مرحله تمام فرزندان بررسی می‌شوند و بین آن‌ها فرزندی که مقدار هیورستیک آن کمینه است انتخاب می‌شود حتی اگر مقدار هیورستیک آن بیشتر یا مساوی گره ریشه باشد.

از آن‌جا که ممکن است مقدار هیورستیک حالت بعدی بیشر از حالت قبل باشد لازم است مکانیزم جلوگیری از حلقه اتخاذ شود. برای جلوگیری از حلقه از یک حافظه برای تاریخچه‌ی حالت‌های دیده شده استفاده شد تا از گذر از حالت‌های قبلا دیده شده اجتناب شود. با در نظر گرفتن این قابلیت بعضا ممکن است حالتی پیش بیاید که تمام کنش‌های helpful منتج به حالت‌های تکراری شوند، در این حالت انتخاب کنش را بین تمام کنش‌های ممکن قرار دادیم تا جست‌وجو متوقف نشود.

* + - ورژن **enforced**: این ورژن منطبق با نسخه‌ی اصلی الگوریتم است، یعنی جست‌وجو در یک فلات تا چندین سطح ممکن است ادامه پیدا کند تا به یک حالت دارای هیورستیک **کمتر** نسبت به حالت ریشه برسیم.
    - ورژن **modified\_enforced**: نسخه‌ی اصلی الگوریتم در بعضی حالت‌ها (مانند محیط large-a) به فلات بسیار گسترده برمی‌خورد که تا مدت‌ها در آن جست‌وجوی BFS را ادامه‌ می‌دهد. در نسخه‌ی modified\_enforced تغییراتی داده شده که ممکن است در بعضی محیط‌ها نسبت به نسخه‌ی اصلی مقاله بسیار سریع‌تر جست‌وجو را به اتمام برساند.

ایده‌ی اصلی به این صورت است که در جست‌وجوی BFS اگر یک حالت با هیورستیک برابر با حالت ریشه‌ هم مشاهده شد، در صورت تکراری نبودن انتخاب می‌شود. این ویژگی ممکن است باعث رفتن به حالتی شود که فلات کوچک‌تری دارد و همان‌طور که در عمل نشان داده می‌شود باعث سریع‌تر شدن جست‌وجو در برخی محیط ها (مانند large-a) می‌شود. از طرف دیگر ممکن است تعداد اکشن‌های پلن نهایی کمی طولانی‌تر بشود.

* + - ورژن **probabilistic\_modified\_enforced**: دو نسخه‌ی قبلی هر کدام مزایا و معایبی نسبت به هم دارند. نسخه‌ی modified\_enforced ممکن است باعث سریع‌ شدن جست‌وجوی نسخه enforced در برخی مسائل شود. ولی در برخی مسائل مانند (twelve-step) ممکن است به یک حالتی (دارای هیورستیک ۶) برسد و تعداد بسیار زیادی حالت غیرتکراری با هیورستیک یکسان با حالت ریشه‌ را انتخاب کند.

برای برطرف کردن مشکل بالا، می‌توان انتخاب حالت‌های دارای هیورستیک یکسان با ریشه را به صورت احتمالاتی () انجام داد. در این روش سعی شده است مزایای دو روش قبل ترکیب شود. نتایج آزمایش‌ها نشان‌دهنده‌ی موفق بودن این نسخه‌ در عمل است.

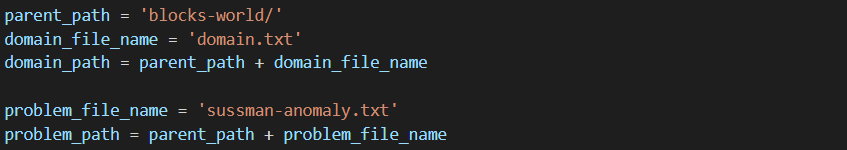
* ماژول Benchmark: این ماژول به منظور ارزیابی و مقایسه پلنر‌های پیاده‌سازی شده معرفی می‌شود. از طریق این ماژول هم امکان مقایسه روی Benchmarkهای معروف فراهم شده است و هم از طریق تولید تعدادی مسئله رندم. در قسمت‌های بعدی نتایج این ماژول به صورت مفصل‌تر شرح داده می‌شود.

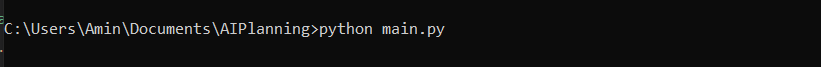
با توضیحات فوق ساختار کدهای پیاده‌سازی شده تا حد زیادی روشن شد. در قسمت‌ بعد نحوه اجرای برنامه‌ریز روی یک ورودی دلخواه را بررسی می‌کنیم.

1. **اجرای برنامه‌ریزی برای یک مسئله دلخواه**

برای آن که بتوان روی یک مسئله دلخواه برنامه‌ریزی را انجام داد، کافیست مراحل زیر طی شوند:

* هر دو فایل دامنه و توصیف مسئله را در پوشه‌ای در مجاورت مجموعه کدها قرار دهید. (با پسوند .txt)
* وارد کد main.py شوید و آدرس‌های نوشته شده در ابتدای فایل را طوری تغییر دهید که با آدرس مد نظر یکسان شود.

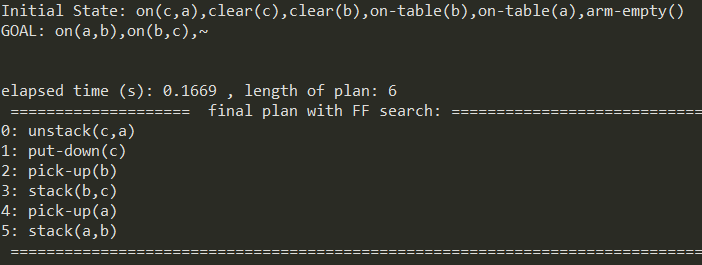


* حال کافیست به سادگی فایل پایتون main.py را اجرا کنید:

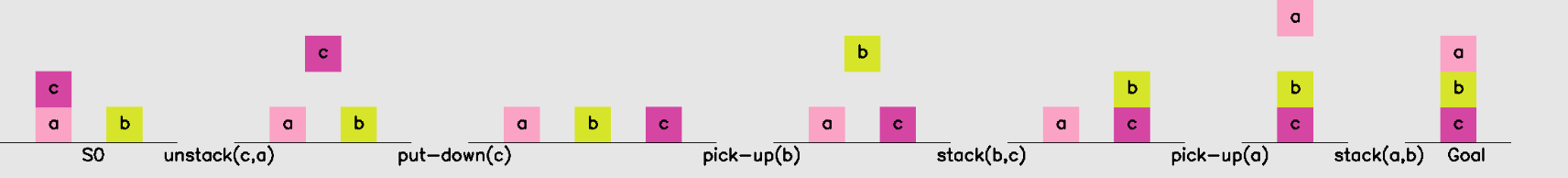
در صورتی که قدم‌های فوق به درستی برداشته شوند، سه نوع خروجی به دست می‌آیند:

1. خروجی متنی:

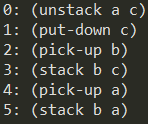
در صورتی متغیر standard\_print با False مقداردهی شود و اجرای برنامه‌ریز با موفقیت همراه باشد، یک خروجی متنی در کنسول چاپ می‌شود که نشان دهنده کنش‌هایی است که ما را از حالت شروع به حالت پایان می‌رساند. نمونه‌ای از این خروجی را برای مسئله Sussman در شکل زیر مشاهده می‌کنید:



1. خروجی گرافیکی:

ما به منظور افزایش خوانایی و ساده‌سازی دیباگ کردن پروژه، یک ابزار گرافیکی قدرت توسعه دادیم. این ابزار گرافیکی مختص مسئله بلاک‌ها طراحی شده است و با دریافت حالت شروع و پلن استخراج شده یک نمایش گرافیکی از وضعیت‌های میانی تولید می‌کند. یک نمونه از موارد تولید شده با این روش را در شکل زیر مشاهده می‌کنید. (برای مشاهده موارد بیشتر با وضوح بالاتر می‌توانید به پوشه Result مراجعه کنید)

1. خروجی فایل با فرمت استاندارد : در صورتی که standard\_print با True مقداردهی شود خروجی به صورت ساده و منطبق با خواسته‌های صورت پروژه چاپ می‌شود.



1. **ارزیابی کارایی برنامه‌ریزهای پیاده‌سازی شده**

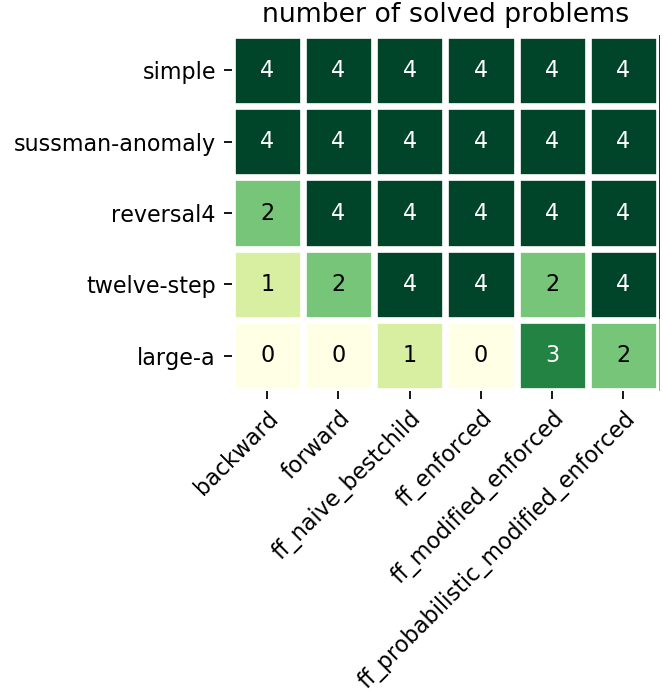
در این بخش به ارزیابی برنامه‌ریزها و مقایسه آن‌ها خواهیم پرداخت. برای انجام ارزیابی، ما از دو مجموعه مسائل کمک می‌گیریم: اول مجموعه مسائل استانداردی که از طرف تیم تدریس به همراه پروژه داده شده است و دوم مجموعه مسائلی که ما به صورت رندم تولید می‌کنیم:

1. مقایسه برنامه‌ریزها روی مسائل استاندارد:

در فایل‌های تحویل شده از طرف تیم تدریس، توصیف 5 مسئله استاندارد از دامنه مکعب‌ها قرار دارند. ما روی این 5 مسئله، برنامه‌ریزهای خود را آزمایش می‌کنیم و در نمودارهای زیر مقایسه می‌کنیم. برای آزمایش هر برنامه‌ریز روی هر مسئله حداکثر زمان ۲۰۰ ثانیه برای حل مسئله در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل تصادفی بودن روش‌ها هر آزمایش هم ۴ بار تکرار استفاده شده است تا به طور مناسب‌تری بتوان آن‌ها را قضاوت کرد.

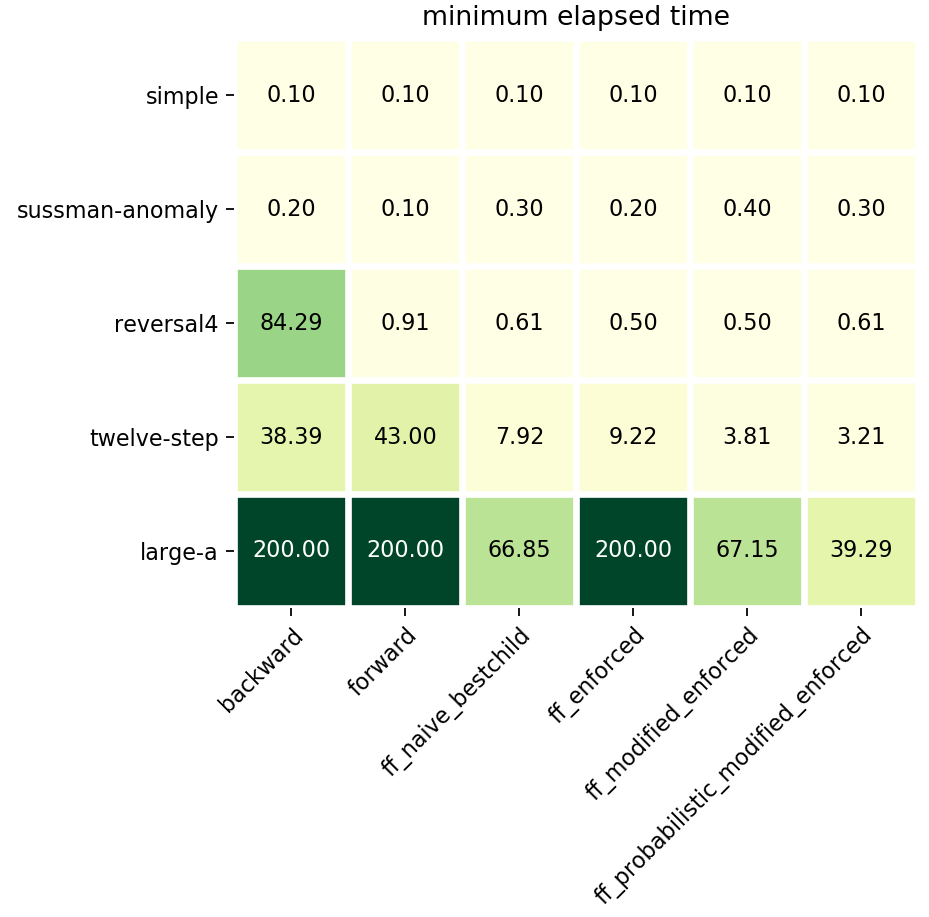
توجه شود که برنامه‌ریز naïve\_greedy فقط موفق به حل مسئله‌ی simple بوده و در بقیه مسائل در کمینه‌ی موضعی گیر می‌کرد. لذا از آوردن آن در نتایج اجتناب شده است.

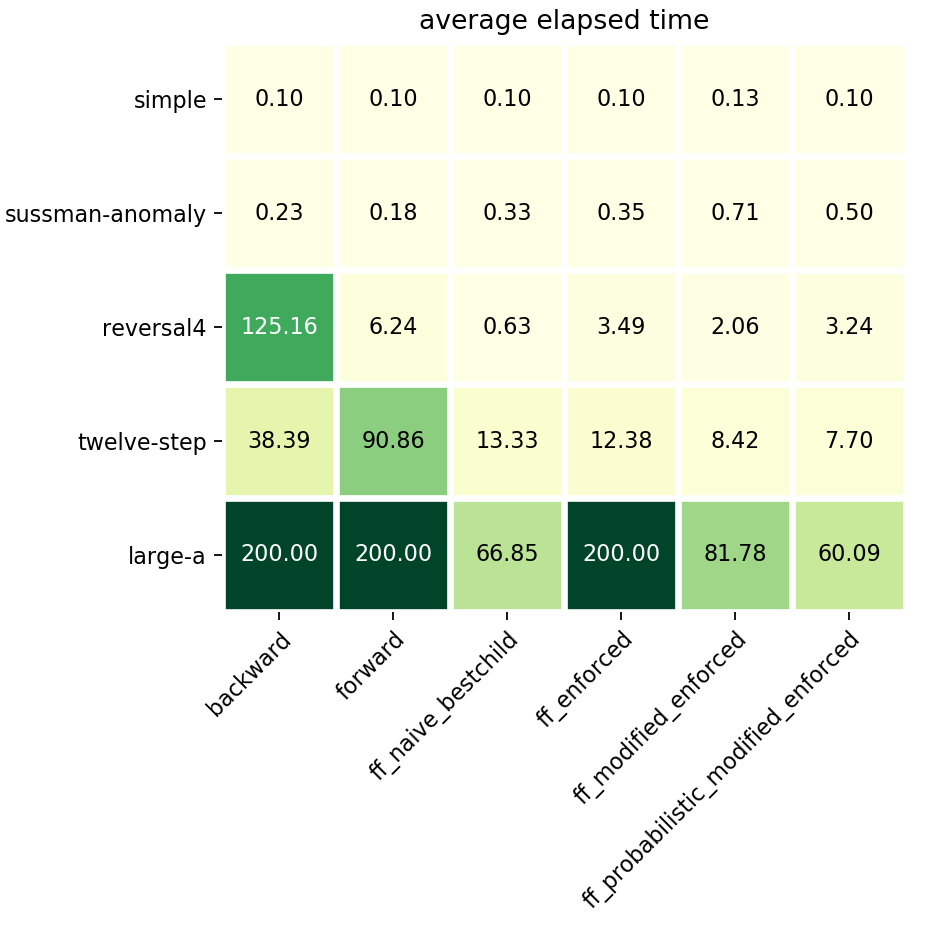
در شکل زیر تعداد دفعاتی که برنامه‌ریز‌ها توانسته‌اند مسئله را در زمان ۲۰۰ ثانیه حل کنند آورده شده است.



همان‌طور که مشاهده می‌شود نسخه‌های مختلف برنامه‌ریز‌های fast-forward در مسائل پیچیده‌تر بر روش‌های forward و backward برتری نسبی دارند. همچنین در بین نسخه‌های مختلف fast-forward مشاهده می‌کنیم که نسخه اصلی مقاله موفق به حل هیچ مسئله‌ای در زمان ۲۰۰ ثانیه نشده است ولی حتی روش naïve\_bestchild که جست‌وجوی آن تا یک سطح است توانسته است یک مسئله large-a را در زمان مناسب حل کند. همچنین روش modified\_enforced نسبت به روش اصلی در حل مسئله‌ی large-a موفق‌تر است. در نهایت به نظر می‌رسد روش probabilistic\_modified\_enforced در مجموع بهتر از سایر روش‌هاست.

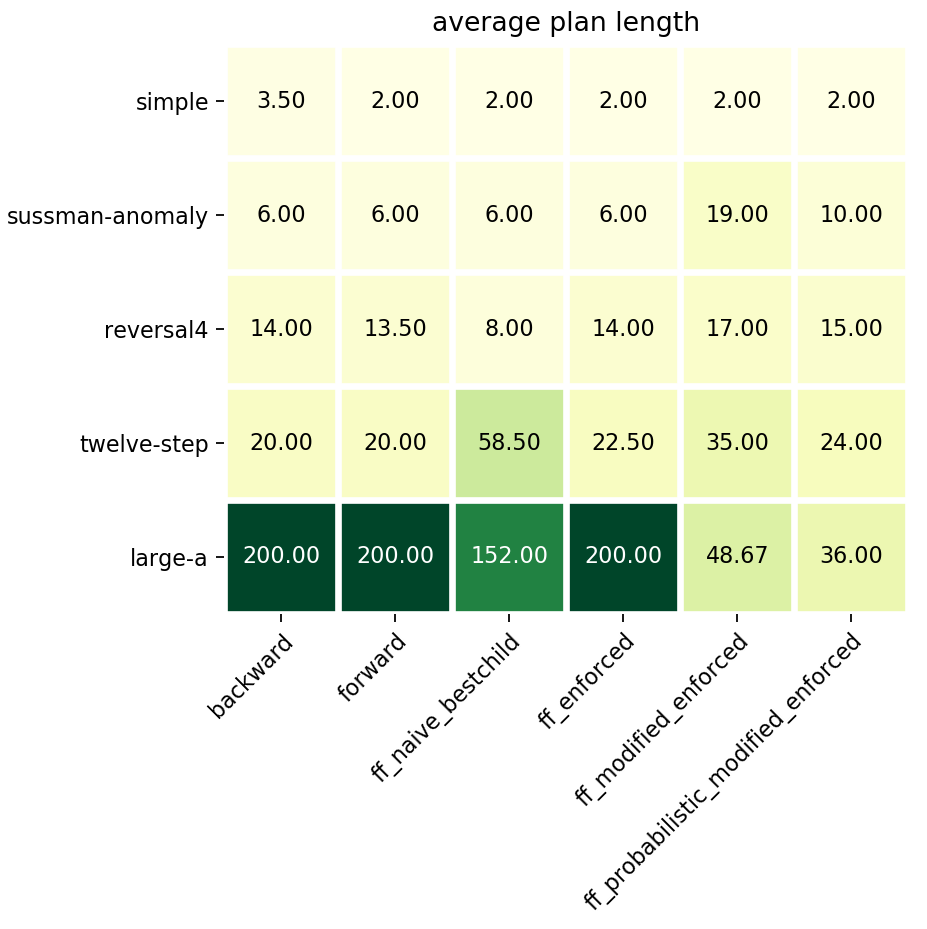
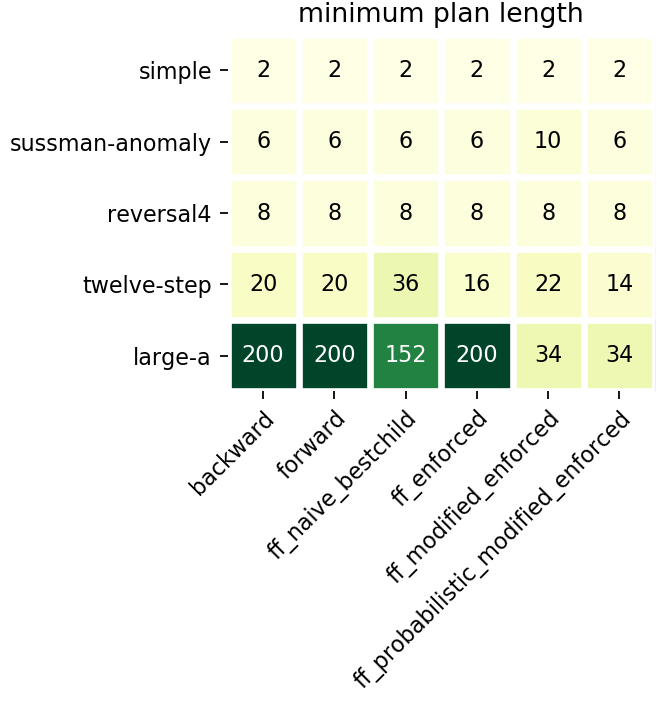
در شکل زیر مقدار کمینه و متوسط زمان مصرف شده در ۴ تکرار هر آزمایش نشان داده شده است (مقدار ۲۰۰ نشان دهنده‌ی عدم موفقیت حل مسئله در ۲۰۰ ثانیه و در ۴ تکرار مختلف است.)





همان‌طور که مشاهده می‌شود با توجه به هزینه‌بر بودن نحوه‌ی جست‌وجوی نسخه‌ی اصلی fast-forward (enforced) در فلات‌های بزرگ، نسخه‌های ابتکاری ارائه شده توسط این گروه در مسائل سخت‌تر بسیار سریع‌تر هستند.

مقدار کمینه و متوسط برنامه‌ی نهایی به دست آمده در ۴ تکرار هر آزمایش نشان داده شده است (مقدار ۲۰۰ نشان دهنده‌ی عدم موفقیت حل مسئله در ۲۰۰ ثانیه و در ۴ تکرار مختلف است.)



همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چند نسخه‌‌های ابتکاری ارائه شده نسبت به روش اصلی fast-forward سریع‌تر هستند، به دلیل relaxed تر بودن جست‌وجو معمولا طول برنامه‌ی نهایی بهینه نیست و کنش‌های اضافی دارد. در بین این نسخه‌ها هم naïve\_bestchild در دو مسئله‌ی دشوار برنامه‌ی طولانی تر به دست آورده است.

در مجموع با در نظر گرفتن مدت زمان جست‌وجو و طول برنامه‌ی نهایی و همچنین تعداد موفقیت‌ها، به نظر می‌رسد که نسخه‌ی probabilistic\_modified\_enforced در این مسائل موفق‌ترین روش است.

توجه کنید که در آزمایش‌های فوق، یک محدودیت روی عمق درخت جست و جو و یک محدودیت زمانی روی مدت زمان اجرای الگوریتم در نظر گرفته شده است. بنابراین منطقی به نظر می‌رسد که برخی از الگوریتم‌ها با این محدودیت‌ها نتوانند به جواب برسند. لذا در هر مسئله برای پلنری که به جواب مسئله دست پیدا نکند، در نمودار فوق جای خالی قرار داده‌ایم.

1. مقایسه برنامه‌ریزها روی مسائل تصادفی:

برای ایجاد تنوع بیشتر در آزمایش‌ها، ما سعی کردیم دسته‌ای از مسائل تصادفی را در این بخش ایجاد کنیم و برنامه‌ریزهای خود را روی آن‌ها ارزیابی نماییم.

برای تولید مسئله رندم، از یک حالت آغازین از قبل داده شده شروع می‌کنیم و به صورت رندم کنش‌هایی را روی آن اعمال می‌کنیم. سپس بخشی از گزاره‌های به وجود آمده در حالت پایانی را به عنوان هدف انتخاب می‌کنیم و از این طریق یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی تشکیل می‌دهیم.

جدول مقایسه زیر برتری برنامه‌ریز FF نسبت به دو برنامه‌ریز دیگر را نشان می‌دهد:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| برنامه‌ریز | متوسط زمان اجرا (ثانیه) | متوسط طول برنامه به دست آمده | تعداد شکست‌ها (از مجموع 200 مسئله) |
| Forward | 0.49 | 12.49 | 0 |
| Backward | 34.77 | 6.78 | 10 |
| FF |  |  |  |

1. آزمایش روی مسئله reversal n
2. **مطالعه نقات قوت برنامه‌ریز FF**
3. **جمع بندی**