

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

UMĚLÁ INTELIGENCE PRO DESKOVOU HRU CARCASSONNE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

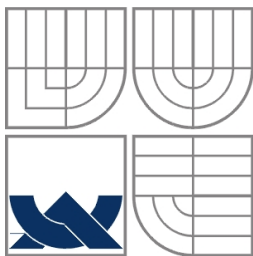
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

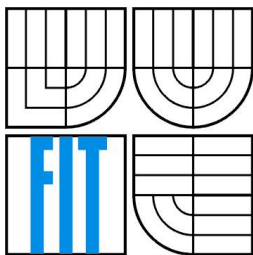
AUTHOR

JAN ČERNOHUB

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÝCH SYSTÉMŮ

FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER SYSTEMS

UMĚLÁ INTELIGENCE PRO DESKOVOU HRU CARCASSONNE

CARCASSONNE BOARD GAME ARTIFICIAL INTELLIGENCE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

JAN ČERNOHUB

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

ING. JAROSLAV STRUŽKA

BRNO 2011

Abstrakt

Obsahem práce je návrh, vytvoření, testování a vyhodnocení virtuální adaptace populární společenské deskové hry Carcassonne pro osobní počítače. Včetně algoritmů řešící umělou inteligenci soupeře - za tímto účelem je vypracována analýza pravidel, cílů a herních strategií vzhledem k některým principům z teorie her s pravděpodobností. Dále jsou zpracovány nároky na zvolený formát datové a procedurální prezentace díla spolu s uživatelským rozhraním. Závěr práce nastiňuje možnosti budoucího rozšíření aplikace stran pokročilejších algoritmů umělé inteligence, jako jsou neuronové sítě.

Abstract

The aim of the thesis is to design, build, test and evaluate a virtual adaptation of popular board game Carcassonne for personal computers, including artificial intelligence algorithms for opponents. The core revolves around analysis of the game's rules, goals and gaming strategies in regards to general principles put forward by the game theory and probability, these also include description of chosen data format, procedural behavior and graphical user interface. Thesis concludes upon reflection on future possible development and improvement of the application in the areas of advanced artificial intelligence algorithms such as neural network programming.

Klíčová slova

Carcassonne, deskové hry, umělá inteligence, pravděpodobnost, teorie her

Keywords

Carcassonne, board games, probability, artificial intelligence, game theory

Citace

Černohub Jan: Umělá inteligence pro deskovou hru Carcassonne, bakalářská práce, Brno, FIT VUT v Brně, 2011

UMĚLÁ INTELIGENCE PRO DESKOVOU HRU CARCASSONNE

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Stružky.

Další informace mi poskytl Ing. David Kubát.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....
Jan Černohub
30. dubna 2011

Poděkování

Ing. Davidu Kubátovi
Ing. Ivě Černohubové

© Jan Černohub, 2011

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů..

Obsah

Obsah	1
1 Úvod.....	2
1.1 Filozofická reflexe.....	3
2 Společenská stolní hra Carcassonne	4
2.1 Pravidla hry	5
2.2 Charakteristika základních strategií	9
2.3 Vliv náhody	10
2.4 Rozšíření základní herní sady	11
3 Carcassonne a teorie her	13
3.1 Definice pojmů	13
3.2 Klasifikace hry Carcassonne	13
4 Adaptace hry pro osobní počítače	14
4.1 Topologie kartiček.....	14
4.2 Topologie herní plochy	17
4.3 Grafické uživatelské rozhraní.....	20
4.4 Vztah aplikace hry a umělé inteligence.....	21
4.5 Implementace	23
5 Umělá inteligence	25
5.1 Rozhodovací faktory	25
5.2 Rozhodovací proces	27
5.3 Heuristiky	30
6 Testování.....	31
7 Vyhodnocení a závěr.....	32

1 Úvod

Práce přistupuje k problematice z několika hledisek. V první řadě se snaží o vytvoření jednoduchého formálního slovního aparátu, kterým lze specifikovat a pojmut stolní předlohu hry Carcassonne. Na tomto formálním základu pak dále staví. Od definice pravidel hry až k samotné tvorbě aplikace hry a na ní navazující řešení umělé inteligence

Velký důraz je ve výkladu kladen na vazby v rámci topologie herních kartiček, jejíž správné pojetí a vhodná reprezentace je nezbytnou podmínkou pro úspěšnou tvorbu umělé inteligence. Jedna kapitola je věnována hře Carcassonne z hlediska teorie her. Další části se zabývají požadavky na aplikaci hry a její realizací. Následuje pojednání o umělé inteligenci a popis jejího testování. Závěr práce spočívá ve vyhodnocení výsledků a popisu možných budoucích rozšíření řešené problematiky.

Okrajově je také zpracována úvaha o lidském myšlení a lidském vjemu v porovnání s výpočetním zpracováním informací.

Mojí osobní motivací pro zpracování tématu je, právě bližší příležitost, z praktického hlediska prozkoumat tento částečně filozofický vztah, a zároveň si vyzkoušet práci s technologiemi pro objektové programování na projektu většího rozsahu, než zahrnují moje dosavadní zkušenosti.

1.1 Filozofická reflexe

Jeden z přínosů výpočetní techniky a potažmo umělé inteligence dnešní filozofii spočívá ve schopnosti sestavit plně deterministické systémy, které jsou schopny evokovat zdání svobodné volby, z toho samozřejmě vůbec nelze odvozovat, že lidské neurony a posléze i myšlení pracují na identických principech klasické logiky, nicméně to ukazuje, že přechod od jednoduchých zcela deterministických struktur, které zapojeny v určité hierarchii a řádu, jsou schopny utvořit celek jež disponuje vlastnostmi daleko za možnostmi jeho jednotlivých součástí - úvaha tradující se již od časů Aristotela.

Dnešní neurologie s pomocí evoluční teorie, chemie, fyziky a v neposlední řadě výpočetní techniky, která poskytuje nástroje nedostupné všem předchozím generacím badatelům, stojí právě před takovou výzvou: ukázat postupnou linii vývoje lidského (a nejen lidského) vědomí, té části živočišné hmoty, která se vyznačuje schopností adaptace a složitostí.

Jedno již lze říci s jistotou, a to že základní lidské smysly nepodávají ani zdaleka kompletní vjem okolního světa, který byl postupně odkryt a rozšířen lidským intelektem, namísto toho je naše vědomí virtuální simulací provádějící účtyhodné zpracování a syntézu aspoň těch dostupných vjemů, která je však nutně jen abstrakcí, zjednodušením, ve kterém detekujeme vzorce, které budou snad adekvátní stavu okolní hmoty.

Slovo hmota je zcela na místě v tom smyslu, že téměř již není opodstatněné pochybovat, že funkční mozková kůra je pro naše vědomí podmínkou nutnou. Zda je i podmínkou dostačující je prozatím nepodstatné, důležité je, že ji lze především dále zkoumat.

Můj osobní dojem je pak tento: čím více člověk zjišťuje „jak“ fungují procesy přeměny hmoty, či chcete-li světa kolem nás, tím více se oprostí od otázek typu „proč“ a „za jakým účelem“, které jsou nutně stigmatizovány jeho původem rodu Homo Sapiens, který začal chápat, že věci mohou mít účel, a posléze mohl zajít tak daleko, že tušil účel za vším, a který si výtvarným řečí a písmu osvojil nebývalou moc nad svým okolím, jakož i nad sebou samým, a posléze chtěl tímto způsobem vyjednávat a smlouvat prakticky se vším - včetně bouře, zemětřesení a morových epidemií.

V každém případě se touha po životě s jasnými pravidly, vymezených ať už dohodou nebo pečlivým pozorováním světa kolem nás, prolíná všemi kulturami a civilizacemi. Touha po životě jako hře, kde lze zodpovědně volit a odhadovat na důsledky této volby. Připomeňme si Shakespearovo:

*„ All the world's a stage,
And all the men and women merely players „*

A zalistujme ve slovníku anglického jazyka - zda je řeč o hercích, nebo o hráčích.

2 Společenská stolní hra Carcassonne

Reálná předloha hry Carcassonne je společenská stolní hra, jejíž autorem je Klaus-Jürgen Frede, byla poprvé vydána v roce 2000, a v roce 2001 získala v Německu prestižní ocenění „*Spiel des Jahres*“ (hra roku).

Hra je inspirována motivy skutečného města Carcassonne na jihu Francie a jeho okolí, ve středověku nechvalně proslulého náboženskými nepokoji, dnes oblíbený cíl turistických výprav kvůli jeho jedinečné historické výstavbě a atmosféře.

Základem hry jsou čtvercové kartičky s vyobrazenou částí krajiny, ta sestává z luk, úseků cest, částí měst a klášterů. Náhodným losováním kartiček a postupným přikládáním v souladu s pravidly vzniká rozrůstající se krajina, která určuje děj hry. Každý hráč má k dispozici omezený počet vlastních figurek, které může během svého tahu položit na jím právě pokládanou kartičku, tím vznikají územní nároky, a také z nich vzniklé zápolení o území, které jsou v průběhu hry přepočítávány na bodové hodnocení, vítězem hry se stává hráč, který má na konci hry nejvíce bodů.



Obr. 1 herní plocha

Úspěšnost hry je dána především soutěží hráčů o ovládnutí jednotlivých oblastí pomyslné krajiny, kterou sami utváří, na základě logického myšlení a analýzy motivů svých spoluhráčů, které tak mohou vnímat i jako spojence nebo soupeře. Právě vhodná kombinace náhody v podobě losování herních kartiček a determinovaných rozhodnutí hráčů o vlastní podobě tahu vzniká unikátní herní zážitek, který stojí kdesi mezi hrou v kostky a klasickým šachem.

Ať už je odměnou vítězství nebo prostý požitek ze hry a emocí které dovede rozvířit, Carcassonne je přístupný širokému spektru hráčů.

2.1 Pravidla hry

Zde podaný výklad pravidel není přímo převzatý z herního manuálu deskové hry, přesto se z hlediska podstaty pravidel hry jedná o ekvivalentní popis. Odlišná formulace pravidel vychází jednak z potřeby formálnějšího přístupu vzhledem k charakteru práce a jednak slouží ke snazšímu pochopení pozdějších kapitol.

Pravidla hry lze rozdělit do 3 kategorií:

- **Protokol**
- **Topologická pravidla**
- **Pravidla bodování**

Protokol udává pořadí úkonů, které hráči musí nebo případně mohou vzhledem k probíhající fázi hry udělat. Topologická pravidla popisují jakým způsobem lze přikládat do pomyslné herní šachovnice kartičky s vyobrazenou krajinou, a za jakých podmínek může hráč, který je na tahu, na pokládanou kartičku vložit svoji figuru. Bodovací pravidla pak určují, jak jsou hráči za zvolné tahy v souladu s pravidly hry ohodnoceni.

Ve stručnosti uvádím **protokol pro základní verzi hry**:

1. Příprava

- a) Určení barvy a pořadí hráčů
- b) Přidělení 6-ti figurek stejné barvy každému hráči
- c) Připravení zamíchaných herních kartiček rubem vzhůru pro losování
- d) Položení první, základové, kartičky

2. Tahy jednotlivých hráčů v cyklech dle daného pořadí

- a) Vylosování náhodné kartičky pro tah
- b) Přiložení kartičky do pomyslné šachovnice herní plochy
- c) Případné vložení figury na tuto kartičku (viz topologická pravidla)
- d) Případné započítání bodů a navrácení figur hráčů (viz bodovací pravidla), pokud došlo vložním kartičky k „vyhodnocení“ některé z oblastí.

3. Konec hry nastává po tahu hráče, který pokládal poslední kartičku

- a) Do skóre hráčů se započítají body za všechny zbývající hráči obsazené oblasti
- b) Na základě součtu všech bodů, které hráči získali v průběhu hry, je určeno konečné pořadí hráčů.

Topologii herní plochy určují čtvercové herní kartičky, které stylizují části krajiny, ve kterých lze rozlišit **úseky oblastí**, v krajině základní herní sady lze rozeznat **4 typy oblastí**, kartičky které obsahují pouze jednu část oblasti jsou spíše výjimečné, obvykle kartička obsahuje dvě a více úseků oblastí často různých typů.

Louka	Město	Cesta	Kláster
			

Tabulka 1 – grafická reprezentace jednotlivých typů oblastí

Další důležitou vlastností kartiček jsou její hrany, **každá hrana obsahuje jeden nebo tři části úseků oblastí**, právě příslušnost úseků oblastí k hranám tvoří nejdůležitější prvek topologie hry. Pro účely následujících kapitol je potřeba zdůraznit rozdíl mezi **oblastí (kontejnerem, množinou)** a **úsekem oblasti (objekt v kontejneru, prvek z množiny)**.

Při pokládání kartičky je potřeba ji umístit souvisle k již položeným kartičkám do pomyslné šachovnice tak, aby aspoň k jedné z nich **přiléhala aspoň jednou hranou**, a jednotlivé **úseky oblastí na hranách pokládané kartičky přecházely do typově ekvivalentních oblastí na všech kartičkách sousedních**. S každou svou **sousední kartičkou** může tak být spojena právě jednu svou hranou, tímto vzniká dojem rozrůstající se krajiny, kterou tvoří **souvislé oblasti**.



Obr. 2 - platný a neplatný tah

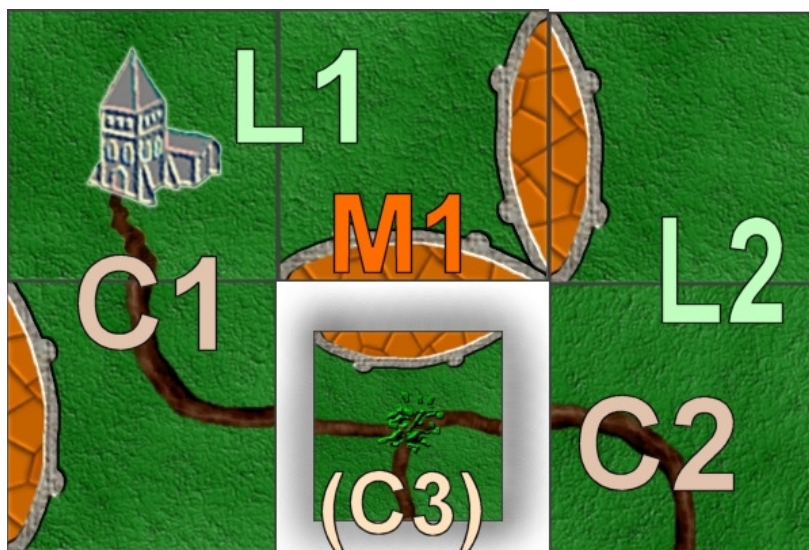
Za povšimnutí stojí rozdíl mezi grafickou a formální reprezentací téže topologie, zatímco grafická reprezentace je z hlediska lidského chápání triviální, na úrovni formálního matematického modelu (viz kapitola 4.1), ze které může implementace program hry přímo vycházet, se jedná o celou řadu podmínek, které je třeba prověřit, zatímco člověk zde bez významné námahy těží z mechanismů vědomí, které zajišťují zpracování zrakového vjemu.

Po položení kartičky dojde vždy **vzhledem ke každému pokládanému úseku oblasti** k aspoň jedné události, které jsou důležité z hlediska bodování a pravidel pro pokládání figurek:

- **Založení nové oblasti** - pokud je úsek oblasti na pokládané kartě přítomen pouze na hranách, které nesousedí s žádnou kartičkou z předchozích tahů.
- **Rozšíření stávající oblasti** - pokud je úsek oblasti na pokládané kartě přítomen aspoň na jedné hraně, která sousedí s některou kartičkou z předchozích tahů.
- **Propojení stávajících oblastí** – pokud je úsek oblasti na pokládané kartě aspoň na dvou hranách, kde aspoň dvě z nich rozšíří dvě různé oblasti.
- **Uzavření stávající oblasti** - pokud k došlo rozšíření nebo propojení stávající oblasti a zároveň již neexistuje žádná hrana kdekoliv na herní ploše, přes kterou lze právě rozšířenou oblast dále rozšiřovat.

Na právě jeden z úseků oblasti takto právě položené karty **může** hráč, a to pouze hráč který tuto kartu právě položil, **vložit jednu ze svých figur**, pouze ovšem tehdy **nenachází-li se na** žádném z úseků **oblasti**, do které zmiňovaný úsek právě pokládané karty nově náleží, jakákoliv **figura z předchozích tahů**.

Na následujícím příkladu budou demonstrovány všechny typy výše zmíněných události během jediného tahu.



Obr. 3 demonstrace událostí po hráčově tahu

Uskutečněním tahu z (Obr. 3 demonstrace událostí po hráčově tahu, bude založena nová oblast cesty C3, rozšířeny stávající oblasti C1, C2, L1, L2 a M1 (a nepopsaná oblast louky v levém dolním rohu, pravé dolní karty), dále také dojde k propojení oblastí L1 a L2 do jedné jediné oblasti, a uzavření oblastí C1 a M1.

Pravidla bodování jsou různá pro různé typy oblastí. V případě **cest a měst** je bodování vázáno **na celkový počet kartiček**, které obsahují úseky oblastí náležící do právě zkoumané oblasti. V případě **klášterů** je rozhodující **počet karet obklopující kartičku s klásterem** ve všech osmi směrech. V případě vyhodnocení **louky** je **rozhodující celkový počet sousedících uzavřených měst**, tedy že existuje aspoň jedna vazba mezi úseky zkoumané oblasti města a úseky zkoumané oblasti louky v rámci aspoň jedné karty, kde **úsek louky přechází do úseku města**.



Obr. 4 – úsek oblasti louky přecházející do úseku oblasti města

Všechny oblasti jsou v průběhu hry vyhodnoceny, každá pouze jednou. **Proces vyhodnocení** obnáší kontrolu, zda na úsecích zkoumané oblasti mají někteří hráči přítomny své figury, a pokud ano vyhodnotí se kdo je vlastníkem oblasti:

Vlastníkem oblasti je jeden nebo i více hráčů, kteří mají na úsecích zkoumané oblasti v součtu **největší vliv**, přičemž **vliv přímo odpovídá počtu hráčových figur** v oblasti, všem vlastníkům se přičtou body dle následující tabulky, a všem hráčů, kteří měli v oblasti figury budou navraceny zpět pro případné použití v dalších tazích.

Poznamenejme ještě, že úseky oblastí mohou obsahovat dodatečné vlastnosti tzv. **modifikátory oblastí**, které ovlivňují bodovou hodnotu oblasti. Např. v případě **města** jde o **štít** (viz Obr. 2 - platný a neplatný tah), tyto modifikátory jsou hojně využity v rozmanitých rozšířeních základní sady, o kterých bude stručně pojednáno na konci kapitoly.

Typ oblasti	Kdy je oblast vyhodnocena	Za kolik bodů
Cesta	a) pokud byla uzavřena b) jinak až na konci hry	počet kartiček oblasti
Město		a) 2x (počet kartiček + počet štítů v oblasti) b) počet kartiček + počet štítů v oblasti
Kláster	a) kartička s klásterem je ze všech osmi směrů obklopena jinými kartičkami b) jinak až na konci hry	1 + počet obklopujících kartiček
Louka	pouze na konci hry	3x (počet uzavřených měst které s loukou sdílí společnou hranici)

Tabulka 2 bodové vyhodnocení obsazených oblastí dle typu

2.2 Charakteristika základních strategií

Před obecnou charakteristikou vybraných základních strategií poznamenejme, že jedna kartička obsahuje obvykle více než jeden typ oblasti, a tím pádem je její položení na herní plochu, i když obvykle je odůvodněno strategií toho či onoho typu, nevyhnutelně poplatné i strategiím ostatním ať už pro nebo proti prospěchu hráče.

Základní strategie, která vůbec umožňuje hráči se angažovat ve hře, je **mít k dispozici figurky** rozmístěné jednak na herní ploše, tak aby při procesu vyhodnocení přinesly hráči co možná nejvíce bodů, a jednak mít dispozici figurky volné pro přikládání během jeho vlastních tahů, z toho plyne, že hráč musí dobře zvážit, zda během tahu vůbec položí figurku na políčko, a měl by se snažit preferovat tahy, které způsobí vyhodnocení a navrácení jeho figurek z herní plochy zpět do jeho zásoby pro budoucí použití. Vzhledem k různorodosti topologie kartiček může poměrně snadno dojít k situaci, kdy oblast na které mají hráči umístěny figurky nebude již nikdy možno uzavřít.

Strategie s ohledem na typy oblastí, které se vyskytují na právě pokládané kartě, by měly brát v potaz následující:

- **Cesty** přináší nejnižší bodové zisky v poměru na jeden tah, o to více jsou významné vzhledem ke městům a loukám, kdy položením karty s cestou lze buď přímo zamezit, nebo minimálně znesnadnit rozšiřování (popř. uzavírání) některé z oblastí na herní ploše.
- **Kláštéry** mají vzhledem k bodovým ziskům na jeden tah obvykle vyšší hodnotu než cesty, a vzhledem k tomu že jsou vždy obklopeny úsekem louky, slouží pro louky okolních karet jako účinná pojítka.
- **Města** jsou patrně nejbohatším zdrojem bodů, ale také jsou nejtěžším typem oblasti z hlediska uzavírání. Právě na nich a na oblastech luk se odehrává většina zápolení mezi potenciálními vlastníky oblasti, boj o vliv vznikne vzájemným propojením dvou oblastí měst, které již figurky obsahují, do jedné společné oblasti města.
- **Louky** jsou nejobtížnějším zdrojem bodů, především kvůli skutečnosti, že figurka jednou umístěná na louku na ní zůstává až do konce hry a také proto, že málokdy lze s jistotou odhadnout jaký počet uzavřených měst bude s loukou na konci hry sousedit. Obecně lze říci že obsazování luk z počátku hry je riskantní, a přílišným vyčkáváním na obsazení opravdu výhodné oblasti louky zase hráč riskuje, že potenciálně zajímavou oblast první obsadí někdo z protihráčů.

Povšimněme si, že může snadno nastat situace, kdy strategie, jejímž cílem „je získat co nejvíce bodů“, nemusí být shodná se strategií jejímž cílem „je mít více bodů než soupeři“, v tom smyslu, že existují tahy, kterými lze protihráči zamezit v bodovém zisku. Aby byla taková úvaha vůbec možná, je **potřeba mít povědomí o skóre soupeřů jakož i o jejich bodovém potenciálu**, na který lze usuzovat z aktuálního stavu herní plochy a množiny nepoužitých kartiček.

Jak je patrné, hráč má k dispozici mnoho aspektů pro určení **kvality tahu**. Kvalitou tahu rozumíme sjednocení pohledů všech relevantních strategií do jednotné stupnice, za její **základní jednotku** budeme v budoucích kapitolách považovat **jeden herní bod** dle procesu vyhodnocení.

2.3 Vliv náhody

Vliv náhody, v podobě losování kartiček, spolu v kombinaci s různými strategiemi hráčů, je více než dostačující na to, aby byla každá hra v podstatě unikátní, je velmi pravděpodobné, že hráč, který bude sledovat tutéž strategii pro stejnou sekvenci karet a stejný počet protihráčů, kteří ovšem budou sledovat strategie odlišné od hry předchozí, dosáhne zcela jiného výsledného bodového ohodnocení a pořadí. Proto, aby byla úspěšnost herní strategie hráče prokazatelná, je za potřebí statistické analýzy co největšího počtu her.

Je-li řeč o náhodě, je třeba **rozlišovat mezi losováním kartičky**, které lze matematicky s jistotou modelovat, a **mezi tahy protihráčů**, o kterých můžeme pouze empiricky předpokládat, že se řídí podle nějaké strategie. Pokud si nejsme schopni takovou strategii, která by odpovídala zvolnému tahu, vybavit, považujeme jejich tah za „náhodný“. Stejně tak ovšem může hráč, o kterém zcela naprosto jistě víme, že vybírá svůj tah, ze všech jemu právě dostupných tahů, se stejnou pravděpodobností, zbudit místy zdání, že jeho tahy sledují jistou komplexní strategii.

Schopnost detekovat a pochopit ve svém okolí naučené vzorce, které snad odpovídají motivům jiných lidí, činí ze člověka ve společnosti úspěšného jedince, a právě tento aspekt hry ji činí zábavnou. Avšak vzhledem k omezenému komunikačnímu kanálu mezi člověkem a počítačem, se jedná o nepříliš produktivní větev úvah, aspoň pokud jde o efektivní řešení umělé inteligence. Ačkoliv se lze o detekci motivů protihráčů pokusit, tak neexistuje jednoduchý spolehlivý mechanismus jakým prokázat, a že detekovanému motivu bude hráč poplatný i v následujících tazích, znakem dobré strategie je právě to, že nepotřebuje být opřena o znalost motivů soupeře. Z tohoto důvodu lze na **všechny možné tahy protihráčů** v rámci implementované umělé inteligence pohlíženo jako na **stejně pravděpodobné**, tedy náhodné.

Jinak je tomu ovšem v případě hráče samotného, který zná svou vlastní strategii, či spíše v případě umělé inteligence, vzbuzuje takový dojem. Z pravidel hry pak vyplývá, že záměrem každého úspěšného hráče je získat co nejvíce bodů a zároveň ostatním hráčům v získání bodů zabránit, obojí lze analyzovat na dvou úrovních:

Deterministicky - událostmi které přímo vyvolá zvolený tah.

Stochasticky - zmenšením množiny stavů kterých může hra dále nabývat.

Odhad stochastické složky tahu odlišuje zkušené hráče od začátečníků. Zvládnutí takového úkonu vyžaduje znalost podoby kartiček, které ještě nebyly vylosovány, a velice důležitý je dobrý odhad budoucího vlivu protihráčů na oblasti v okolí tahu. Zjednodušeně řečeno určuje kvalitu stochastické složky, vzhledem k množině budoucích možných tahů, poměr mezi pozitivními budoucími tahy, které vnímáme jako přínosné pro naši strategii sběru bodů, a negativními budoucími tahy, které přináší body soupeřům.

2.4 Rozšíření základní herní sady

První vydání stolní hry Carcassonne slavilo takový úspěch, že se v průběhu následujících let hra dočkala hned několika rozšíření a alternativních zpracování [3].

Základním rysem všech rozšíření pro základní herní sadu je přidání nových herních kartiček, které jsou často zcela unikátní z hlediska topologie předchozí sady, topologický model kartiček z kapitoly 4.1 je navržen tak, aby obsáhl i všechny topologické kombinace ze známých rozšíření které pracují se základními typy oblastí z kapitoly 2.1 a byl snadno rozšiřitelný o nové typy oblastí, která přichází s některými rozšířeními.

Mnohem významnějším z hlediska nároků na umělou inteligenci, jsou však nové způsoby, jakými lze získávat v průběhu hry body, rozsah těchto možností sahá od malých změn při vyhodnocení oblasti v podobě nových modifikátorů nebo nových figurek, až po zcela nové koncepty, ve zkratce charakteristika některých rozšíření hry:

- **Hostince a katedrály:** nové modifikátory pro úseky měst a cest, modifikátory značně zvyšují bodový výnos z oblastí, ve kterých se nachází, avšak pokud nejsou oblasti do konce hry uzavřeny mají na konci hry hodnotu nula bodů.
- **Kupci a stavitelé:** nové modifikátory pro úseky měst - reprezentují 3 druhy surovin. Ten kdo uzavře město jehož součástí jsou některé z těchto modifikátorů, obdrží díly daných surovin. Na konci dostane za jednotlivé druhy surovin body ten hráč, který nasbíral nejvíce dílů pro danou surovinu. Ještě zajímavější je nová figurka stavitele, díky které může hráč za určitých podmínek položit dvě kartičky během jednoho svého tahu. Další novou figurkou je čuník, který zvyšuje bodové výnosy z louky, ke které byl přidělen.
- **Princezna a drak:** nový modifikátor umožňující během tahu položit figurku i na jinou než právě pokládanou kartu. Nová figurka draka umožňuje odstranění figurek z herní plochy a nová figurka víly poskytující ochranu před figurkou draka.
- **Věž:** nový modifikátor umožňující každému hráči během jeho tahu odstranit z políček nacházejících se v okolí těchto modifikátorů figurku.
- **Král, hrabě a řeka:** základní myšlenkou je odměňovat hráče který právě uzavřel oblast, ze které nemá sám přímý bodový zisk, ale jeho protihráči ano. Jako kompenzaci si může jednu svoji figurku přesunout do stavu pohotovosti. Figurky ve stavu pohotovosti jsou pak hráči k dispozici, a kdykoliv dojde během hry k uzavření oblasti, má možnost přesunout některé z těchto figurek v pohotovosti do právě uzavírané oblasti, aby se tím vzniklý vliv promítl standardním způsobem do procesu vyhodnocení. Dalším přídatkem jsou tituly pro každý typ základní oblasti, které přísluší hráči, jenž uzavřel největší oblast daného typu, na konci hry pak držitel titulu obdrží body za všechny uzavřené oblasti daného typu na herní ploše.

Výčet rozšíření tím není zdaleka kompletní, poznamenejme, že specifikace pravidel každého z rozšíření by obvykle vyžadovala samostatnou kapitolu, všechna rozšíření jsou navíc vzájemně kompatibilní a mnohdy jsou definovány zvláštní pravidla, pokud jsou některá dvě rozšíření použita zároveň.

Obecně lze obsah všech rozšíření rozlišit, vzhledem k umělé inteligenci pro základní herní sadu, do dvou skupin.

- **Do první skupiny** lze zařadit všechny **nové kartičky a nové modifikátory**, které **ovlivňují bodové vyhodnocení** oblastí.
- **Do druhé, mnohem rozmanitější skupiny**, lze zařadit všechny **nové herní koncepty**. V lepším případě tyto koncepty poskytnou nové možnosti bodových zisků, a vynutí si tak obohacení stávajících algoritmů umělé inteligence o novou vyhodnocující větev. V horším případě nové koncepty zcela změní podstatu předchozích ustálených strategií, a nemají tedy ani tak charakter přídatku, jako spíše charakter zcela nové hry.

V každém případě **všechna rozšíření, velkým způsobem zvětšují stavový prostor**, ve kterém se hra může odehrávat. Jak již byl zmíněno, s počtem použitých rozšíření roste počet způsobů jakými lze získávat body, a tedy i počet strategií z jejichž hledisek lze na tah nazírat, čím více je tedy použito herních rozšíření, tím menší je pravděpodobnost, že kvalitní tah bude poplatný pouze jedné z dostupných strategií. Naopak potřeba nalézt tah, který by byl poplatný co možná největšímu množství strategií, se stává převládajícím principem a zároveň největší výzvou pro tvorbu úspěšné umělé inteligence.

Při postupném přibírání jednotlivých rozšíření do herní sady, lze jednoznačně sledovat nárůst bodů, které hráči během jedné hry zvládnou získat. Z praktické zkušenosti lze říci, že ve hře, jejíž součástí jsou výše popsaná rozšíření, dosahují hráči zhruba trojnásobku finálního skóre oproti základní sadě, stejně tak časová náročnost hry je téměř trojnásobná, ať už kvůli většímu počtu kartiček, nebo kvůli potřebě složitější analýzy každého z tahů.

Ačkoliv si částí rozšíření, převážně spadající do druhé skupiny (*Princezna a drak, Věž nebo Král a hrabě a řeka*), vyžadují v podstatě zcela nové zpracování umělé inteligence, nepředstavuje tato skutečnost sama o sobě největší problém, největší **zátěž z hlediska aplikace** představuje nová implementace **protokolu hry** (viz 2.1) a především **grafického uživatelského rozhraní** (viz 4.3), které umožňuje uskutečnit operace protokolem definované.

Z těchto důvodů je aplikace navržena s přihlédnutím k možnostem budoucího rozšíření o zmíněné nové koncepty, avšak v rámci bakalářské práce nejsou rozšíření hry prakticky řešenou součástí. Některá rozšíření hry jsou dále blíže rozebrána v kapitole pojednávající o umělé inteligenci (viz 5), spolu s návrhem řešení nových strategií.

3 Carcassonne a teorie her

Cílem kapitoly je popis vztahu mezi řešenou látkou a teorií her. Obecně lze říci, že je poměrně obtížné, z obsáhlého rozsahu látky, jakým teorie her bezesporu je, vybrat koncepty relevantní pro konkrétní řešený problém, už jen proto, že samotná teorie her zasahuje do celé řady vědních disciplín, od informatiky přes ekonomii až k politologii.

3.1 Definice pojmů

V obsahu práce jsou poměrně často zmiňovány následující pojmy ([2] kap. 3.12).

- **Stavový prostor** je určen množinou stavů hry, kterých může podle pravidel hra nabývat, a přechody mezi těmito stavy. Vzniklá struktura se nazývá stromem stavového prostoru.
- **Větev stromu stavového prostoru** je spojitou částí stavového prostoru, počínající v jednom jediném stavu a končící až na listech podstromu. V průběhu hry se každým tahem zužuje stavový prostor na jednu konkrétní větev.
- **Strategie** určuje pro všechny možné stavy ve stavovém prostoru jeden přechod (tah) do jednoho z následujících možných stavů.

3.2 Klasifikace hry Carcassonne

([1] kap. 1) Carcassonne jednoznačně spadá do kategorie *kooperativních* her v tom smyslu, že spolupráci protihráčů nelze vyloučit. Počet postupně pokládaných kartiček ve hře je konečný a proto existuje pro ni existuje „*Nashovo equilibrium*“.

To znamená, že aspoň teoreticky jsem schopni vyjmenovat celý stavový prostor, které během kterékoliv fáze hry může následovat, až do posledního tahu hry. Lze tedy předpokládat, že pro každého hráče existuje pro každého hráče jedna optimální strategie. Zároveň ovšem platí, že nejsme obvykle schopni prakticky prohledat celý stavový prostor hry, který je díky losování kartiček a jejich komplexní topologii velmi rozsáhlý, navíc bychom museli předpokládat že protivník se optimální strategií opravdu řídí.

Prohledání celého stavového prostoru nakonec ani není nezbytně nutné, při pečlivé analýze naší současné větve stavového prostoru nejčastěji zjistíme, že bez znalosti strategie protihráče „je cokoli možné“. Naopak je třeba soustředit pozornost na situace, kdy je velmi pravděpodobné, že hra bude nabývat, pro zkoumanou část herní plochy, co možná nejmenšího počtu různých stavů.

Z těchto důvodů v podstatě dochází při praktickém řešení umělé inteligence pro hru Carcassonne k přechodu od „*rozhodnutí s jistotou*“ na „*rozhodnutí s rizikem*“, riziko je dáno počtem možných budoucích stavů vyhovujících záměrům naší strategie, ku počtu stavů které jí nevyhovují.

4 Adaptace hry pro osobní počítače

Stolní hra Carcassonne se již dočkala několika digitálních zpracování na různé platformy včetně mobilních telefonů a herních konzol, patrně nejúspěšnější adaptací je komerční adaptace „*Carcassonne: The Computer Game*“ pro osobní počítače německé společnosti *Koch Media*. Tato adaptace zahrnuje kompletní řešení včetně hry více hráčů on-line, a především kvalitní zpracování umělé inteligence. Problémem při porovnávání adaptací hry, mimo již zmíněné rozdíly v platformě, je obvykle uzavřenost kódu, neboť se často jedná o komerční řešení. A jakékoliv srovnání by bylo tedy omezeno v podstatě jen na vnější grafickou stránku aplikace.

Dalším nedostatkem, z hlediska porovnávání kvality umělé inteligence, je **absence jednotné formální báze**, na základě které by bylo možno zcela postihnout průběh hry. Příklad takové jednotné formální báze lze najít u některých klasických her, jako jsou šachy, kde lze každou hru popsat relativně jednoduchou sekvencí tahů, to umožňuje tvůrcům umělé inteligence, po implementaci patřičných rozhraní, které zajišťují přechod od definice tahu z formální báze do jejich vlastního systému, porovnávat dvě odlišná řešení umělé inteligence.

Pokud prozkoumáme nároky, které hra Carcassonne klade na takovou formální bázi, zjistíme, že jsou mnohem komplexnější než je tomu v případě šachu, zvláště pak jsou-li vzaty v potaz všechny možná rozšíření (viz 2.4).

Následující kapitoly se nepřímo zabývají právě tvorbou takovéto formální báze pro hru Carcassonne. Z formální báze pak přímo vyplývá datový návrh aplikace a na to navazující algoritmy, řešící reprezentaci a průběh samotné hry, na kterou dále navazují algoritmy řešící umělou inteligenci.

4.1 Topologie kartiček

Z topologických pravidel (viz 2.1), vyplývá potřeba reprezentovat tyto **vlastnosti kartiček**:

- **Jednotlivé úseky oblastí na kartičce**
 - vymezení místa na kartičce, kam lze položit figurku tak, aby patřila k tomuto úseku
 - seznam modifikátorů úseku
 - v případě úseku louky, seznam úseků sousedících měst na této kartičce - s nimiž má společnou hranici (Obr. 4 – úsek oblasti louky přecházející do úseku oblasti města)
- **4 hrany po obvodu kartičky**, kde je každá hrana tvořena jedním nebo třemi úseky oblastí na kartičce, a kde jsou každé dvě hrany, vzhledem k poloze na kartičce, v jednom ze vztahů:
 - sousedním
 - protilehlým

Je třeba upozornit, že takto definovaná topologická část formální báze, umožňuje i definici kartiček, které nejsou a patrně nikdy nebudou přítomny v herní sadě. Je proto zodpovědností toho, kdo bude nové kartičky definovat, aby zajistil jejich konzistenci vzhledem ke známým kartičkám.

Zde je dobrá příležitost opět poukázat na zdánlivou samozřejmost, se kterou si lidská mysl z grafické reprezentace dovede vytvořit vjem o vlastnostech kartičky, a zároveň obtíže s jakými lidský intelekt převádí tento vjem do formální podoby, kterou teprve lze opravdu představit svým kolegům. Stojí za povšimnutí jak namáhavou transformací si musel projít přirozený jazyk, aby po úporné snaze dovedl poněkud neobratně vyjádřit, to co lidský zrakový vjem vyjádří ve zlomku vteřiny.

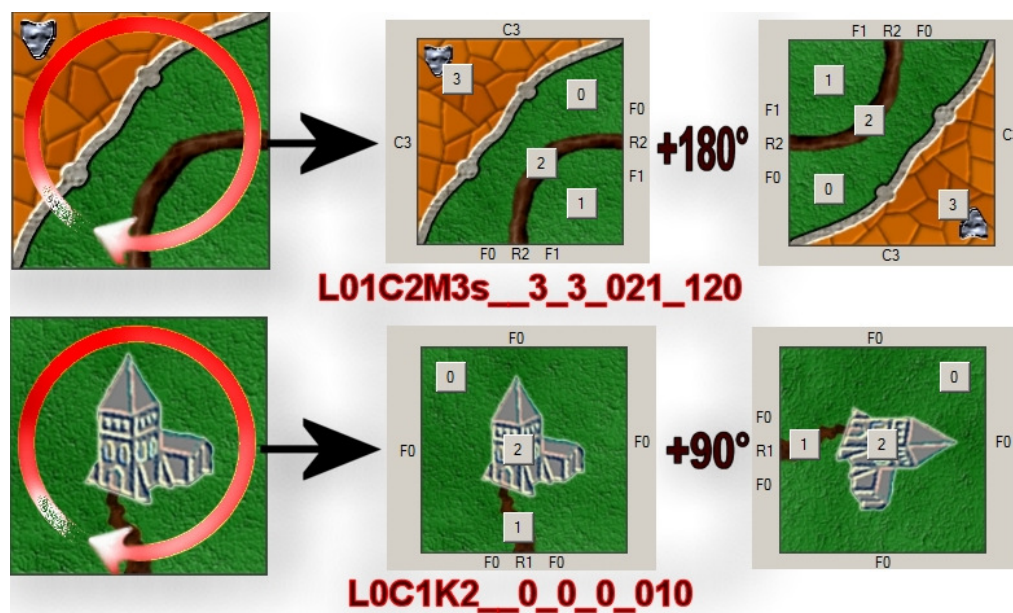
Pro každý typ kartičky definujeme dvojicí souborů

- Oba soubory mají **stejný název**, a liší se pouze v koncovce. Je to právě **jednoznačný řetězec** v **názvu** souboru, co umožňuje poměrně snadno nadefinovat topologii pro daný typ kartičky. Platný názvový řetězec, pro základní herní sadu, by měl být bezezbytku zpracovatelný následujícím regulárním výrazem:

\.txt!jpg

1. **Část řetězce definující počet a typy oblastí.** Kde je nejprve písmenem definováno jaké typy úseků oblastí budou načítány (L' pro louky ,M' pro města ...), následuje sekvence číslíc se znakem pro modifikátory (,s' pro štít), kde každá číslice značí existenci nového úseku oblasti, přičemž hodnota číslice bude indexem jednoznačně identifikujícím tento úsek v druhé části řetězce. Z toho plyne že by se, v této části každá číslice měla vyskytovat pouze jednou, jinak se jedná o špatně definovanou kartičku.

- 15



Obr. 5 Ukázka tvorby topologie kartičky z řetězce jejího názvu.

Poznamenejme, že žádná, z karet současných rozšíření neobsahuje více než 9 úseků oblastí (4 hrany s cestou a klášterem na křižovatce), a proto je tento způsob záznamu kartičky zcela postačující.

Posledním vztah, který nebyl doposud definován je **sousedství úseků měst s úseky luk**, tento vztah lze detekovat z již zadaných údajů vyšetřením všech 4 rohů kartičky, vazba vzniká, pokud se v některém **rohu kartičky setkává louka** s městem, a je zaznamenána na v datech úseku louky, pro kterou je tento údaj potřebný při jejím bodovém vyhodnocení.

Důležitou vlastností kartičky je **možnost rotace**, teprve kombinací **topologické a grafické reprezentace** kartičky s údajem o **natočení**, vznikne po patřičných 2D transformacích vizuálně i datově platná kartička. Další součástí herní plochy jsou **figurky hráčů**, ty jsou přímo **vázány na** nadefinované **úseky oblastí**.

Zachováním záznamu o hranách a úsecích k nim náležících ve tvaru, v jakém byl původně zapsán, tedy jako sekvenci čtenou po směru hodinových ručiček, lze triviálním způsobem zajišťovat rotaci, tento datový formát je ovšem velice neintuitivní pro práci s kartičkou v rámci herní plochy, a musí být proto převeden do intuitivnějšího tvaru, který je vázán přímo na jedno vybrané natočení kartičky (viz pojem políčko v následující kapitole).

Výpočetně náročnější je grafický výstup, který je kromě rotace obohacen o **funkci vizuálního zvětšení/zmenšení** grafické reprezentace kartiček, propočítat je zde třeba nejen rotaci obrázku kartičky, ale také grafickou reprezentaci případných figurek na jednom z úseků oblasti karty.

4.2 Topologie herní plochy

Dalším krokem ve tvorbě aplikace hry je **reprezentace herní plochy** (Obr. 1 herní plocha), která sestává z jednotlivých kartiček postupně přikládaných hráči. To si vzhledem k doposud dostupným datům vyžaduje následující:

- Vytvoření herní plochy v podobě **šachovnice**.
 - Atomem šachovnice je **políčko**. Každé políčko má své **4 sousední políčka**, s každým sousedním políčkem je spojeno právě jednou svojí hranou a jednou hranou sousedního políčka. Každá **hrana** je **rozdělena na 3 úseky** které jsou vnímány jako prostředky pro tvorbu topologie herní plochy.
- Přejít od kartičky jako samostatné entity ke kartičce jako součásti herní plochy. Takovou kartičku, která je součástí herní plochy, budeme nazývat **políčkem s kartičkou**, políčko bez kartičky je **políčko prázdné**.
- Přejít **od úseků oblasti** (prvku množiny, prvku kontejneru), **k oblasti** (samotné množině, kontejneru)

Herní plocha je stejně jako kartičky prezentována na dvou úrovních. Na úrovni grafické, je definována pomocí obrázků položených kartiček a pozice jejího políčka v šachovnici. Na úrovni topologie je pak herní plocha definována **množinou oblastí**, které mají vazby k políčkům šachovnice.

Každá **oblast** $O = \{U, H\}$ je z topologického hlediska definována:

- **Množinou úseků oblastí** U identického typu, tedy úseky oblasti ve smyslu vlastnosti kartičky (viz 4.1) označované jako u .
- **Množinou hranic** H . Každá hranice je tvořena dvojicí $h = \{u, P_p\}$:
 - **Úsek oblasti** u , který hranici tvoří. Přičemž $u \in U$, a zároveň je u součástí **políčka s kartičkou** P_u .
 - **Prázdné políčko** P_p , do kterého hranice ústí. Platí tedy, že P_u a P_p jsou políčka sousední.

Každá **hranice** tím vlastně **odkazuje na konkrétní hranu** svého políčka s kartičkou P_u , kde jeden z úseků této hrany obsahuje právě úsek oblasti u příslušející k dané hranici, a pomocí P_p udává směr, kterým se oblast může rozrůstat.

Vzhledem k topologickým pravidlům hry (viz 2.1) pro každou **oblast** O platí, že **je vždy spojitá**: Buď je složena pouze z jednoho úseku oblasti, nebo pro všechna $u \in U$ existuje $v \in U$ tak, že P_u a P_v jsou sousední políčka s kartičkami a na některém z protějších úseků těchto dvou hran spojující tyto políčka jsou proti sobě přítomny oblasti u a v .

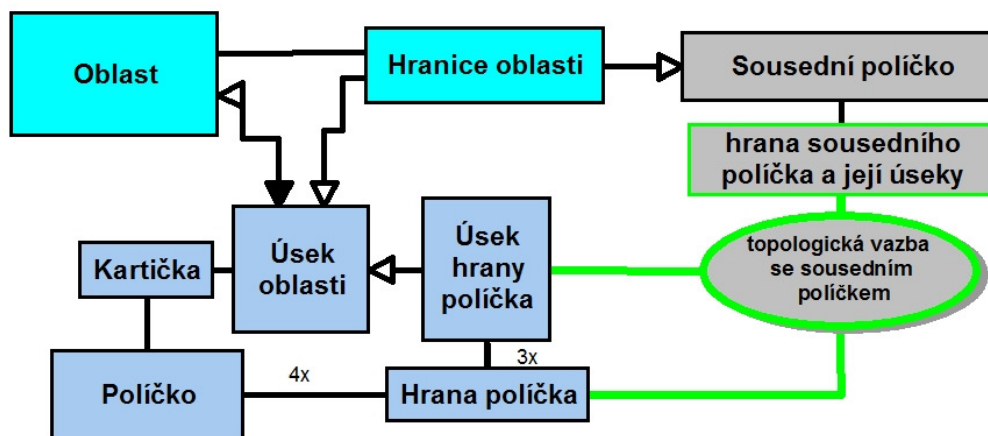
Oblast je **uzavřená**, pokud již nemá žádnou hranici, tedy pokud je množina H prázdná.

Herní plocha vzniká **postupným přikládáním kartiček**, aby bylo možné kartičku na dané políčko přiložit, musí být pro každou ze čtyř hran B potenciálního políčka s kartičkou a její protilehlou hranu B_s sousedního políčka P_s splněna jedna z následujících podmínek:

- **Bud'** je P_s prázdné políčko.
- **Jinak** všechny úseky hrany B_s musí obsahovat typově identické úseky oblastí vzhledem k protější hraně B .

Pro názornější pochopení topologických vazeb mezi políčky a oblastmi následuje grafický model těchto vztahů.

- Spojující černé linky bez šipky značí vztah „náleží k“.
- Bílá šipka značí vztah „odkazuje na právě jeden“.
- Černá šipka značí vztah „odkazuje se na jeden a více“.



Obr. 6 Model topologických vztahů políček a oblastí.

Model barvou odděluje 3 části. **Světle modrou část pro oblast**, která ve své podstatě představuje pojítka mezi úseky oblastí v různých políčkách, které tvoří tuto souvislou oblast. **Tmavě modrou část**, která představuje **data** jednoho **konkrétního políčka**. A konečně **šedá** barva značí existenci 4 sousedních políček.

Aby byl model přesnější je potřeba dodat, že **ne všechny vztahy jsou vždy přítomny**. Vždy existuje pouze vztah mezi úsekem oblastí a oblastí. Úsek oblastí však nemusí být vždy odkazován v množině hranic oblasti (při spojení oblastí prvky některé hranice zanikají), a zároveň nemusí být odkazován z žádného z úseku hrany políčka, na kterém se nachází (případ kláštera, který je implicitně uzavřená oblast již při vzniku).

Posledním vztah vyvedený **zeleně** pak znázorňuje, že navzájem přiléhající hrany, respektive jejich protilehlé úseky musí mít typově ekvivalentní, a tvoří tak spojitou oblast, nebo ústí do prázdného políčka. Na úrovni hran políček pak můžeme mluvit o přechodech ve spojitě krajině, sestavené z oblastí. Tak jak určují topologický pravidla hry (viz 2.1).

Pro **vytvoření topologické reprezentace jakéhokoliv stavu herní plochy** v souladu s pravidly jsou pak postačující následující operace nad množinou všech stávajících oblastí na herní ploše. Operace probíhají vždy **po platném přiložení nové kartičky na herní plochu**, a zároveň tedy dochází k přeměně prázdného políčka na políčko s kartičkou P_n .

1. **Proces založení nových oblastí.** Nová oblast O_n vzniká z každého jednoho úseku oblasti u_n v P_n , u_n je tedy jediným prvkem v množině úseků oblastí U_n . V závislosti na přítomnosti u_n na hranách políčka P_n jsou dopočítány hranice nově vzniklé oblasti O_n - její množina H_n .
2. **Proces sjednocování oblastí.** Ke sjednocení dvou oblastí dojde vždy, když existuje pro libovolné dvě oblasti z množiny všech stávajících oblastí O_a a O_b , **aspoň jedna společná hranice**.
 - **Společná hranice** je tvořena dvojicí hranic $h_a = \{u_a, P_{pa}\}$ a $h_b = \{u_b, P_{pb}\}$, kde $h_a \in H_a \wedge h_b \in H_b$ a zároveň u_a náleží k políčku s kartičkou P_a a u_b náleží k políčku s kartičkou P_b , a platí, že $P_a = P_{pb} \wedge P_b = P_{pa}$.

Při sjednocení dvou oblastí O_a a O_b do oblasti O_n **dochází k zániku všech společných hranic** H_s , tj. hranic které tvoří společnou hranici mezi O_a a O_b , a sjednocení všech zbývajících hranic tedy $H_n = (H_a \cup H_b) - H_s$, a zároveň ke sjednocení všech úseků oblastí $U_n = U_a \cup U_b$. Proces probíhá **iterativně dokud** existují oblasti, které lze sjednotit.

Proces sjednocování lze samozřejmě optimalizovat tím, že budou prošetřeny pouze oblasti nacházející se na úsecích hran sousedících s políčkem P_n , namísto všech oblastí na herní ploše. Oblast jako celek přebírá všechny relevantní informace svých prvků (modifikátory, figury a z nich plynoucí vliv hráčů na oblasti). Je tedy vhodné rozšířit definici oblasti i o tyto vlastnosti:

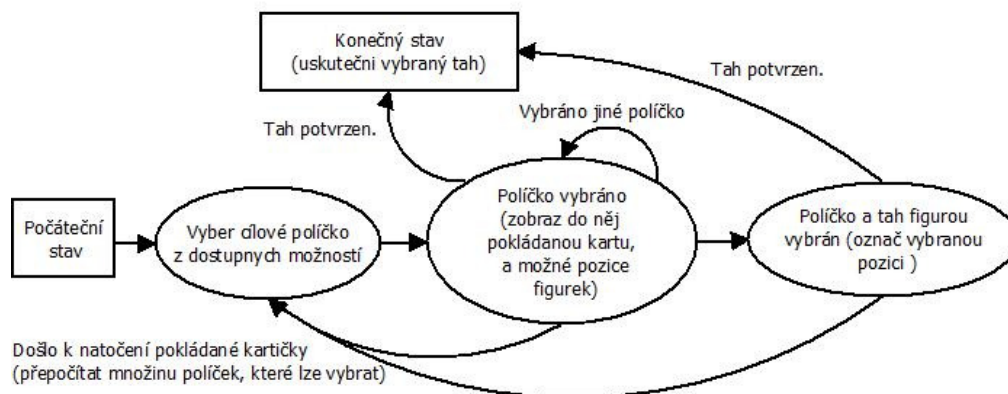
Aby byla herní plocha pro potřeby pravidel hry, přesněji pro potřeby bodového vyhodnocení, kompletní, je zapotřebí funkce $f_b(O)$, která vrací **bodovou hodnotu oblasti** O , v závislosti na jejím typu (Tabulka 2 bodové vyhodnocení obsazených oblastí dle typu a funkci $f_v(O, p)$, která vrací **vliv hráče** p **na oblast** O , obojí lze jednoduše propočítat průchodem přes všechny vlastnosti všech úseků oblastí $u \in U$.

4.3 Grafické uživatelské rozhraní

Grafické uživatelské rozhraní (dále jen GUI z anglického „graphical user interface“) aplikace musí splnit především dvě základní funkce.

- **Prezentovat současný stav hry.**
 - Herní plochu.
 - Skóre a figury jednotlivých hráčů.
- **Umožnit hráči definovat platný herní tah.**
 - Prezentovat právě pokládanou kartičku – umožnit výběr jejího natočení.
 - Prezentovat interaktivní políčka do kterých lze pokládanou kartičku vložit v souladu s pravidly.
 - Prezentovat interaktivní pozice na pokládaném kartičce v políčku, do kterých lze v souladu s pravidly pokládat figurky.

Zatímco první požadavek sám o sobě je poměrně snadný. Tak druhý si vynucuje, že prezentace stavu hry nebude tvořena pouze aktuálním stavem herní plochy, ale také aktuální fází uživatelem řízeného procesu zadávání tahu. Zvolený proces zadávání tahu lze popsat následujícím konečným automatem:



Obr. 7 Konečný automat pro uživatelem řízený proces zadávání tahu.

Důležité je, že každý z těchto stavů si vyžaduje vlastní způsob, jakým vykreslovat uživateli aktuální stav hry. Navíc mají přechody mezi stavy dopad na interaktivní prvky GUI, pomocí kterých je tah zadáván. Interaktivní prvky jsou sestaveny ze základních komponent, jako jsou tlačítka nebo panely, a které jsou stejně jako celá aplikace řízeny pomocí standardního systému zpracování událostí.

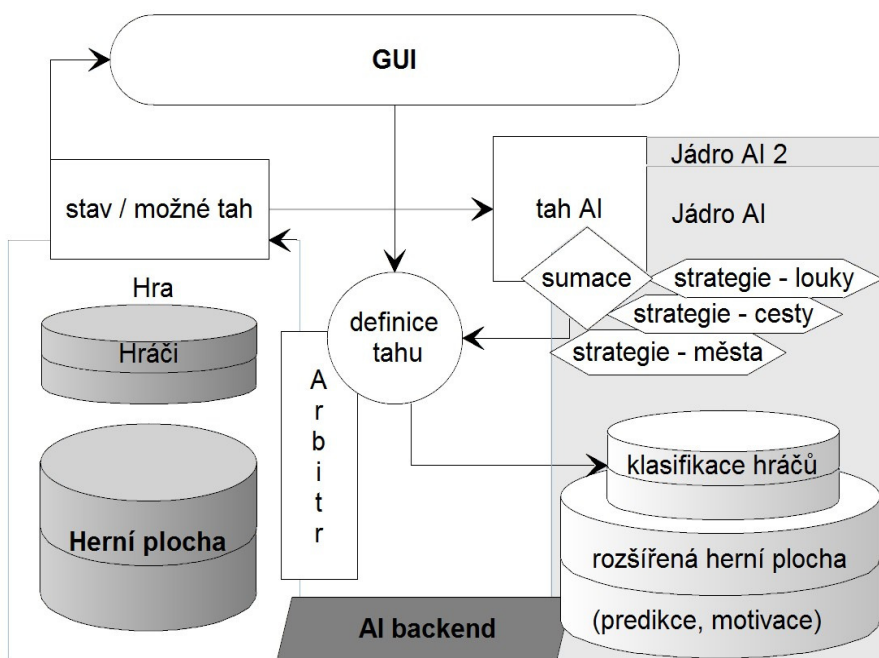
Základní přístup ke GUI je ten, že všechny dostupné možnosti, které má hráč k dispozici jsou mu vždy vizuálně prezentovány, a to tak, aby byla celá aplikace ovladatelná jen za použití počítačového kurzoru, takový přístup je sice na jednu stranu intuitivní, na druhou pak může být značně časově neefektivní. Proto je tato funkčnost doplněna o vstup z klávesnice, a rotaci kolečka počítačové myši, kombinací obou pak vzniká možnost rychle se pohybovat po herní ploše a zadávat tahy.

4.4 Vztah aplikace hry a umělé inteligence

Ačkoliv umělá inteligence tvoří z logického hlediska část separátní od samotné aplikace hry, tak z hlediska implementace se jedná o části velice blízké, neboť umělá inteligence pracuje s informací primárně uloženou v datech právě probíhající hry.

Přístup umělé inteligence k herním informacím lze řešit dvěma základními způsoby, buď lze vytvořit kopii celé informace o stavu herní plochy, a tu předat ke zpracování umělé inteligenci. Výhodou takového přístupu je, že se nemusíme obávat neplatného zásahu do původních dat, a zároveň lze pro kopii libovolně upravovat, při zkoumání možných tahů.

Druhý způsob spočívá v tom, že vytvoříme rozhraní, které zpřístupní umělé inteligenci všechny informace tak aby nemohlo dojít k jejich modifikaci. Vzhledem k velkému množství informací, které může herní plocha obsahovat, a které by bylo zapotřebí duplikovat, a velkému počtu tahů, které je třeba prozkoumat, je tento druhý zvolený přístup mnohem efektivnější z hlediska výpočetní náročnosti.



Obr. 8 Model vztahu umělé inteligence k aplikaci hry.

Jak je patrné z Obr. 8 Model vztahu umělé inteligence k aplikaci hry. měl by modul umělé inteligence (téže AI z anglického „*artificial intelligence*“) mít přístup ke všem informacím, týkajících se hry jako takové, důležité je, že z těchto informací si vytvoří vlastní pojem stavu hry v podobě tzv. meta-dat. **Meta-data** jsou vypočítána na základě platných údajů ze hry, a používány moduly AI při **vyhodnocení tahů**. Meta-data si moduly mohou kdykoliv vytvářet a modifikovat, aniž by docházelo k zásahům do herní plochy jako takové, zároveň jsou ale tato meta-data dočasně platnou součástí herní plochy, čímž umožňují **průchod stavovým prostorem hry** (viz 3.1).

Pojítkem mezi modulem hry a umělou inteligencí je **herní tah**, tah sestává z:

- **Cílového políčka a kartičky v konkrétním natočení.**
- **Volitelné akce - položení figurky.** Poloha figurky na kartě je dána konkrétním úsekem oblasti z cílového políčka s kartičkou.

V rámci možných rozšíření hry (viz 2.4) pak volitelná akce může být třeba odstranění figurek z herní plochy (rozšíření *Princezna a drak, nebo Věž*).

Modul hry vzhledem k ostatním částím aplikace v podstatě plní tyto činnosti:

- **Poskytuje množinu všech platných tahů**, vzhledem k aktuálnímu stavu hry.
- **Dovede zpracovat prvek z množiny současných platných tahů**, a změnit tak stav hry v souladu s pravidly.
- **Poskytuje kompletní informaci o stavu hry** pro čtení modulům umělé inteligence.

Úkolem modulu GUI je tyto informace graficky prezentovat uživateli a umožnit mu výběr jednoho z možných tahů. Úkolem modulu umělé inteligence je pouze vybrat jeden z právě možných tahů.

Vzniká možnost **sestavit libovolný průběh hry pomocí sekvence** jednotlivých **tahů**. Navíc také vzniká možnost krokovat každou odehranou hru pomocí zaznamenané sekvence proběhlých tahů. Krok zpět není v takovém případě přímo operací odebrání předchozího tahu, ale jedná se zde o resetování celé herní plochy a zopakování zaznamenané sekvence tahů, až po požadovaný stav herní plochy. To může mít pozitivní význam při ladění a testování modulů umělé inteligence, nebo může takové rozhraní umožnit i hru více hráčů po síti, za předpokladu, že se vyřeší způsob přenosu definovaného tahu.

Ve zcela obecné lidské rovině lze za inteligentního hráče, považovat toho, kdo dovede učinit tah v souladu s pravidly. Tvorba množiny platných tahů tedy částečně spadá i do oblasti umělé inteligence.

Množinu platných tahů vzhledem ke stávající herní ploše a kartičce, obsahující úseky oblastí $u \in (U \cup \text{none})$, kde *none* značí, že figurka nebude použita, pokládáné v jednom ze čtyř natočení $R = \{0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ\}$ lze vytvořit následujícím způsobem.

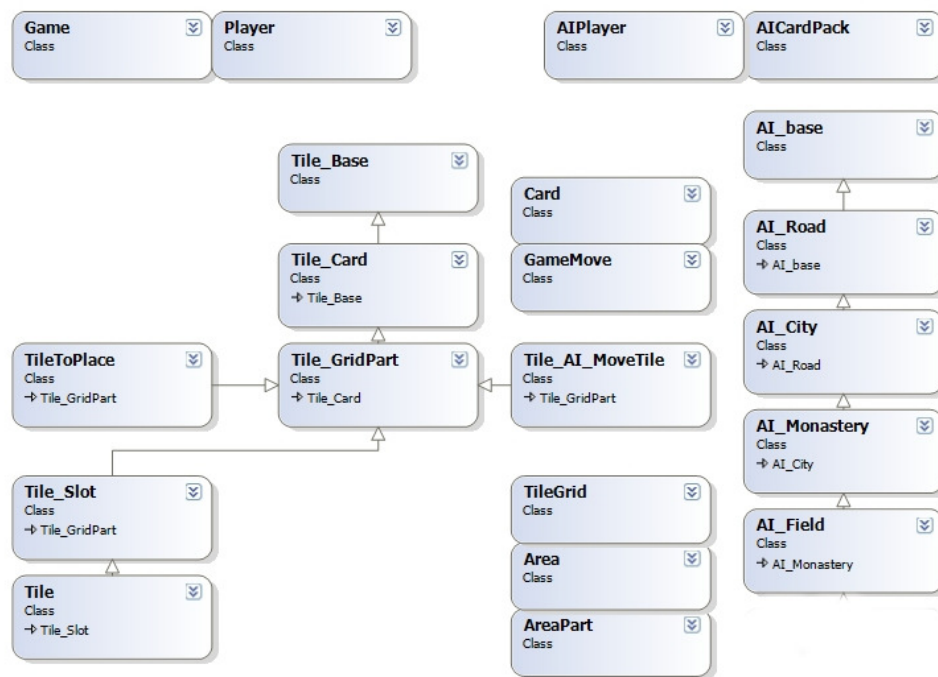
Zjištěním množiny E všech prázdných políček, které sousední s políčkem s kartičkou.

A prověřením každého potenciálního tahu, vzhledem k pravidlům hry. Tedy zda $f_{\text{validmove}}(\{E, K, R, u\}) = \text{true}$, pro konkrétní uspořádanou čtveřici z kartézského součinu $(E \times K \times R \times u)$.

4.5 Implementace

Aplikace hry a umělé inteligence je implementována pomocí technologie *.NET v3.5*[4] v programovacím **jazyce C#**[5]. Program ve spustitelné podobě, by tak měl být přenosný na jakékoliv současné operační systémy *Microsoft Windows*, obsahující odpovídající nebo novější verzi *.NET Framework*. Jedním z motivů pro tvorbu této práce byla právě možnost vyzkoušet si přechod na jiné technologie a práci s profesionálním komerčním vývojovým prostředím konkrétně *Microsoft Visual Studio 2008*

Ve výsledku se jedná o objektově orientované řešení s důrazem na využitím dědičnost a zapouzdření. Následuje zjednodušený diagram vybraných tříd, s pomocí kterého lze nastínit strukturu aplikace:



Obr. 9 Diagram vybraných tříd aplikace.

V levé části digramu jsou třídy implementující protokol hry a GUI, střed tvoří třídy reprezentující topologii herní plochy, napravo jsou pak základní třídy pro výpočty v rámci umělé inteligence.

Základní myšlenkou je oddělit logicky související celky kódu na jednotlivých úrovních dědičnosti, a postupovat v komplexitě po linii dědičnosti až do poslední vrstvy, která plní primárně funkci rozhraní pro přístup z ostatních částí aplikace.

Zejména u tříd reprezentujících moduly umělé inteligence je kladen důraz na budoucí rozšiřitelnost o nové hodnotící algoritmy a data, respektive nové třídy, řešící nové strategie. Zároveň je důležitá znovu použitelnost starších algoritmů, které mohou stále poskytovat relevantní informace.

Při tvorbě topologie herní plochy je bohatě využito skutečnosti, že každá instance třídy je unikátním objektem. Při vytváření množiny oblastí reprezentujících herní plochu, je často využito třídy seznamu s indexem **hash**ovaným podle **jedinečného identifikátoru objektu**. To umožňuje jednak rychlejší přístup při hledání konkrétní oblasti, ale také zamezí výskytu duplicit při operacích sjednocení, a simuluje tak vlastnosti matematické množiny, kde je každý prvek přítomen pouze jednou.

Grafické uživatelské rozhraní je složeno výhradně ze standardních a dobře známých komponent. V případě reprezentace políčka s kartičkou je tak poměrně nekonvenčním způsobem užito komponenty *panelu* a na ní navázaných komponent *tlačítek*. Alternativní řešení by znamenala buď převzít nestandardní knihovnu pro grafický výstup, nebo implementovat její zcela nové řešení, které by postačovalo pro potřeby aplikace (viz 4.3).

Dokumentace implementace aplikace je přímo součástí kódu v podobě za tímto účelem formátovaných komentářů, a je nejlépe čitelná právě jako součást projektu v rámci zvoleného vývojového prostředí, které umožňuje interaktivní průchod kódem a zkoumání jeho souvislostí.

5 Umělá inteligence

Úkolem umělé inteligence (dále jen „AI“) je rozhodnout, který z množiny možných tahů, je pro konkrétního hráče nejvýhodnější tj., který tah je nejkvalitnější. AI tak **zcela definuje strategii** hráče pro všechny stavy hry (viz. 3.1).

Základní postup při vyhodnocování kvality tahu, spočívá ve sběru a utřídění informací obsažených ve hře, především z herní plochy. Abychom informace z herní plochy mohly použít, vytvoříme nad původními daty tzv. meta-data.

Za meta-data považujeme například klasifikaci protivníků, rozšíření údajů z herní plochy o informace o přímém dopadu tahu na vliv hráčů v oblastech, informace používané v heuristikách, a obecně všechny struktury, které jsou dočasně přidruženy nebo vystavěny na informacích z herní plochy, aby mohl proběhnout výpočet kvality tahu.

V první fázi jsou propočítána meta-data, a ve druhé jsou tyto **výsledky** vyhodnoceny, konkrétní sadou výpočtů pro určení kvality tahu. Zatímco první fáze se snaží být co nejvíce objektivní, a zabývá se především sběrem a utříděním informací. Druhá fáze už je poplatná různým strategiím, a tvoří ve své podstatě „osobnost“ AI.

Odstavce v následujícím textu psané kurzívou upozorňují na možnost budoucího rozšíření konceptu, s pomocí pokročilejších algoritmů pro AI, případě budoucí nadstavby této práce.

5.1 Rozhodovací faktory

V první řadě je potřeba roztrždit dostupné informace ze hry, zde seřazené dle očekávané významnosti pro proces rozhodování. Spojením těchto dílčích informací získáme právě meta-informace potřebné k zodpovědnému rozhodování.

- Nejpodstatnější a zároveň nejkomplexnější informace poskytuje **herní plocha**
 - Množina oblastí se vzájemnými vazbami.
 - Oblast má stávající bodovou hodnotu.
 - Oblast může podléhat vlivu hráčů.
- **Hráči**
 - Jejich počet.
 - Jejich skóre.
 - Jejich volné figurky.
- **Balíček nevylosovaných kartiček**
 - Jejich počet.
 - Jejich topologie.

Začneme **zpracováním balíčku nevylosovaných kartiček**, informace o kartičkách je použita při prošetřování stochastické složky tahu, kdy se snažíme o odhadnutí důsledků tahu pro budoucí průběh hry. Především jde o prozkoumání možného **propojení** oblasti s figurkou na právě pokládané kartičce s některou ze stávajících oblastí. A to přes prázdné políčko, do kterého ústí hranice obou oblastí, v průběhu některého z budoucích tahů. Prověření této možnosti představuje jediný způsob, jakým lze cíleně rozšiřovat vliv hráče do neuzavřené oblasti, která již podléhá vlivu (viz topologická pravidla pro pokládání kartiček 2.1).

V kombinaci s počtem hráčů, nám také poskytuje údaj o počtu tahů, které ještě budeme moci uskutečnit, to je relevantní pro **plánování pokládání figur** na herní plochu. Také poskytuje informace heuristikám zkoumající budoucí rozvoje krajiny.

Vzhledem k rozšíření základní sady (viz 2.4) je potřeba soustředit se na políčka obsahující speciální modifikátory, které mohou v budoucích tazích řádně proměnit poměry vlivů hráčů na herní ploše, nebo dovedou zcela změnit bodové hodnocení oblasti.

Informace o každém z hráčů a informace z herní plochy lze spojit do tzv. **klasifikace hráče**, je to údaj řadící každého protihráče vůči AI někam na pomyslnou stupnici mezi vztahy „spojenec - nepřítel“. A to v závislosti na jejich skóre a počtu bodů, které by získali za současného stavu herní plochy byla-li by hra najednou ukončena.

Rozšířením klasifikace o paměť přímých důsledků plynoucích z tahů konkrétního protihráče, lze modelovat tentýž vztah v závislosti na skutečných rozhodnutích. Lze se tak pokoušet o detekování a případně tvorbu recipročního vztahu mezi hráči.

Nejdůležitější informací je vždy stav herní plochy (viz 4.2). **Herní plocha** je chápána jako **množina oblastí**, které svým rozhodnutím upravujeme výhradně **operacemi slučování a tvorbou nových prvků** (připomeňme že oblast sama je množinou složenou z úseků oblastí). Které oblasti budou sloučeny a které oblasti nově vzniknou je dáno právě zkoumaným tahem.

Připomeňme, že každá oblast, má svou bodovou hodnotu v závislosti na jejím typu danou funkcí, a množinu vlastníků, která je podmnožinou množiny hráčů kteří mají v oblasti svůj vliv.

Vyhodnocení informace herní plochy v kombinaci se zkoumaným tahem má dvě úrovně, **deterministickou**, která zahrnuje přímé změny bodové změny a **stochastickou**, která hodnotí dopad tahu na prázdná políčka v jeho okolí, vzhledem k balíčku nevylosovaných kartiček.

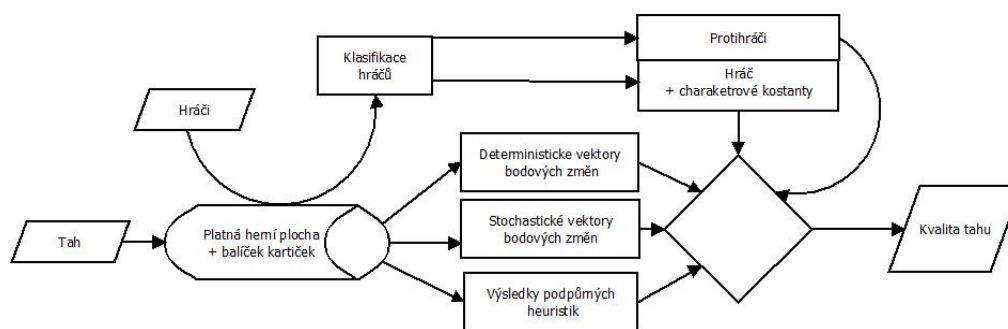
Uskutečněním zkoumaného tahu by došlo k sérii změn na herní ploše, nás pak především zajímají všechny **změny bodové hodnoty oblastí**, ve kterých mají hráči vliv, a **změny hodnoty vlivu hráčů** na oblast.

5.2 Rozhodovací proces

Rozhodovací proces spočívá nejprve v analýze balíčku kartiček a klasifikaci hráčů.

Poté je postupně prověřen každý z možných tahů - je mu **přiřazena hodnota na stupnici kvality tahu**. Základní jednotkou na této stupnici je jeden herní bod podle procesu vyhodnocení (viz Tabulka 2).

Každý tah je zkoumán z různých úhlů pohledu, které odpovídají různým způsobům, kterými můžou hráči získávat body do svého skóre, a zároveň v některých případech, např. při ztrátě vlastnictví oblasti o body naopak přijít.



Obr. 10 Model výpočtu kvality tahu.

Pro zjištění nejzákladnější charakteristiky tahu, je zapotřebí porovnání stavu herní plochy **před tahem a po uskutečnění tahu**.

Výsledkem tohoto porovnání je struktura, kterou v modelu na Obr. 10 Model výpočtu kvality tahu. nazýváme **vektorem bodových změn**, která **pro každého hráče** popisuje, jakým způsobem by se po uskutečnění tahu změnilo jeho postavení ve hře z hlediska: **skóre, bodového potenciálu na herní ploše a počtu volných figur**.

Vektory bodových změn jsou použity jak v deterministické, tak ve stochastické části analýzy tahu, a jsou vázány na konkrétního hráče (dále jen jako „vektory hráče“).

Vektory hráče obsahují:

- Počet bodů, o které se **navýší** hráčovo **skóre**.
- Počet bodů, o které se **změní** bodový potenciál hráče na herní ploše (tento bodový zisk není do konce hry zcela zaručen, může docházet ke ztrátě vlastnictví).
- Počet bodů, které hráč **ztratil ztrátou vlastnictví**.
- **Počet figurek**, které hráč vložil na herní plochu (vždy max. jedna), nebo mu naopak byly navraceny po uzavření oblasti.

Analýza deterministické složky tahu spočívá ve vytvoření vektorů pro všechny hráče, kteří mají vliv v některé z oblastí, jejichž vlastnosti (bodová hodnota, vliv, sjednocení/zánik) by se uskutečněním tahu změnily. To znamená prověřit všechny oblasti na úsecích hran sousedící s cílovým políčkem tahu, včetně nově vytvořených oblastí na cílovém políčku a nesmí se opomenout vztah louky a města, který není vazbou přes hranu políčka.

Stochastické vektory hráčů jsou poněkud odlišné, slouží k odhadnutí bodového zisku, za předpokladu, že dojde v budoucích tazích k propojení **2 konkrétních oblastí** O_n a O_s . První O_n oblast se nachází na pokládaném políčku a druhá oblast O_s kdekoli v okolí pokládané políčka, a zároveň musejí mít že existuje aspoň jedna hranice $h_s \in H_s \in O_s$ a k ní hranice $h_n \in H_n \in O_n$, tak že h_s a h_n ústí do společného sousedního prázdného políčka.

Stochastické vektory hráčů se propočítává pouze za situace, kdy ke propojení došlo, a pouze pro dvojici sloučených oblastí, které by byly propojeny. Vektor hráče je pak obohacen o **pravděpodobnost**, že hráči přijde kartačka, která toto **propojení** umožní. Tato pravděpodobnost je dána počtem hráčů, a složením balíčku nevylosovaných kartaček.

Zde je zcela na místě úvaha, zda rozšířit, tuto pravděpodobnost o fakt, že vlastní li původní oblast, o jejíž propojení usilujeme jiný, hráč, může mít, za určitých podmínek zájem na spolupráci v propojování těchto dvou oblastí a pravděpodobnost by tím mohla být považována za dvojnásobnou. Ovšem stejně tak může nastat situace, kdy protihráč má zájem oblasti nepropojovat.



Obr. 11 Tah modrého hráče, vyžadující tvorbu stochastických vektorů pro město, které může vzniknout přes prázdné políčko (s otazníkem).

Výstupem analýzy stochastické složky tahu tak může být i seznam hned několika dvojic oblastí, u kterých existuje možnost budoucího propojení, ke každé z nich přísluší vektory hráčů, kterých se změny týkají, spolu s pravděpodobností, že takové propojení oblastí nastane.

Jádro rozhodovacího procesu pak pracuje s vypočítanými vektory hráčů pro daný tah. Ve spojení s klasifikací hráčů.

V případě vektorů hráče, který tah provádí, se vektory z deterministické analýzy započítají do kvality tahu přímo, v případě jeho stochastických vektorů jsou jejich hodnoty nejdříve násobeny příslušnou pravděpodobností a až poté přičteny.

Analogicky je tomu **v případě vektorů jeho protihráčů**, s tím, že navíc ještě před přičtením vektorů do kvality tahu promítne porovnání údajů klasifikace AI hráče a klasifikace právě zkoumaného protihráče. To umožňuje zvýšit kvalitu tahů poškozujících protihráče, které vnímáme jako konkurenty.

Při připočítávání obsahů vektorů do kvality tahu lze zavést tzv. **charakterové konstanty**, které umožní zohledňovat některý z vektorů s větší vahou. A tím podpořit například agresivitu hráče vůči jeho protihráčům, nebo třeba zohledňovat stochastickou složku tahu s menším důrazem.

Vytvořením mechanismů, kterými by byly hodnoty charakterových konstant v průběhu hry nastavovány, v závislosti na tahu protihráče, by bylo patrně možné simulovat poměrně rozsáhlé spektrum chování AI hráče.

Posledním krokem ve tvorbě kvality tahu je hodnocení pomocí **heuristik**, které se mohou do kvality promítnout opět jako aditivní změna, nebo mohou modifikovat celou doposud spočítanou kvalitu tahu.

Jde o to, že předchozí koncept postavený na vektorech vycházel ze standardních topologických bodových ohodnocení oblastí. A je právě úkolem heuristik, aby se znalostí výpočtu kvality tahu z hlediska těchto základních bodových ohodnocení tuto skutečnost vyhodnotili v souladu se zcela jinými koncepty získávání bodů.

Očekávání je, že se můžeme přiblížit optimálním strategiím pro AI pro hru Carcassonne, při dostatečně šetrném nastavení vztahů všech právě popsaných entit podílejících se na výpočtu kvality tahu.

Když je spočítána kvalita každého tahu můžeme, pro zpestření vybrat náhodně tah z množiny všech tahů nacházejících nad prahem určeným třeba 90% hodnoty nejkvalitnějšího tahu. Už jen z toho důvodu že existují důvody se domnívat že může jít ve skutečnosti o optimálnější tah než je nejkvalitnější zjištěný.

5.3 Heuristiky

Heuristiky, které pomáhají při výpočtu kvality tahu jsou z části založeny na logické úvaze a z části odvozeny z herní praxe.

Hospodaření s figurkami. Pro ekonomické nakládání s figurkami, se lze držet například následujícího schématu: Má-li hráč k dispozici 4 a více figurek může je bez hlubší analýzy použít. Pod tuto hranici, začíná platit, že čím méně je k dispozici volných figurek, tím kvalitnější jsou tahy, které figurky vrací zpátky do zásoby hráče. A rozhodnutí, zda použít figurku během tahu bere v úvahu, zde není lepší figurku podržet pro lepší příležitost. To opět vyžaduje odhad na možné tahy vzhledem k balíčku nevysolovaných kartiček.

Podobnou úvahu je potřeba provádět i v případě rozšíření základní herní sady „Král hrabě a řeka“, kdy volbou tahu v jedné části herní plochy, sledujeme záměr v jiné části plochy, který s okolím zvoleného tahu topologicky v podstatě vůbec nesouvisí.

Zda je možné dokončit shluk oblastí měst. Heuristika podává jednoduchý odhad na základě analýzy balíčku volných kartiček, kdy je spočítáno množství kartiček, které spojují město v rozích, přes protější hranu, popřípadě po 3 nebo 4 hranách.

Dále se provede detekce shluků zárodků, měst, tj. oblastí které mohou být potenciálně spojeny přes společná sousední prázdná políčka.

Zjistí se, kolik kartiček výše uvedených typů by bylo potřeba, pro ukončení takového shluku měst s nejmenším spotřebou kartiček. Zároveň zjistíme očekávané vlastníky takto vniklé oblasti. Informaci lze použít v souvislosti s propojováním.

Odhad budoucího počtu měst sousedících s loukou. S použitím předchozí detekce shluků. Lze kontrolou všech zárodků měst, které s loukou sousedí, odhadovat počet uzavřených měst které může se mohou na louce vyskytnout a podpořit tak kvalitu tahu, který by umísťoval figurku na louku.

Dalším příkladem heuristiky aditivního charakteru by mohlo být, sběr surovin z rozšíření „Kupci a stavitelé“.

6 Testování

Základní vlastností návrhu umělé inteligence pro aplikaci hry, je její postupný inkrementální vývoj, tak aby šlo nová řešení modulů umělé inteligence (dále jen AI) porovnávat s řešeními staršími.

Testování probíhá na dvou úrovních.

- Statistické testy
- Pomocí grafického uživatelského rozhraní.

Statistické testy spočívají v porovnávání výsledků hráčů AI ze série her, řádově stovek her, kde je jedinečnost každé hry vázána na pseudonáhodný generátor čísel.

Vzhledem k mé osobní zkušenosti se hrou očekávám, že vznikne korelace v úspěšnosti modulů AI, budou-li vzájemně porovnávány v různých hrách následující moduly, zde vypsané v pořadí určeném inkrementálním vývojem:

1. Náhodně zvolený tah
2. Tah největšího okamžitého zisku.
3. 2. + klasifikace protihráčů
4. 3. + stochastický výhled tahu
5. 4. + heuristiky

Problémem takového testování je, že potvrzuje úspěšnost AI modulu pouze při hře proti konkrétním soupeřům, kteří v podstatě používají podmnožinu jeho vlastní strategie.

Spolehlivějším testem úspěšnosti řešení se jeví hra proti člověku. Časová náročnost takového testování je značná, zvláště je-li vzat v úvahu počet všech možných parametrů, kterými lze definovat vlastnosti modulu AI.

Kombinací obou přístupů testování, s pomocí vývojového prostředí a jeho ladících nástrojů, by měla vzniknout možnost aspoň částečné validace a verifikace navržených modulů. A konečně výběru neoptimálnějších řešení z dostupných testovaných.

Dobrou úvahou na téma testování je rozšířit GUI aplikace o schopnost graficky prezentovat AI modulem vypočítanou kvalitu tahu hodnotou barvy. Barvou by se zvýraznila příslušná část herní plochy odpovídající danému tahu, a to během uživatelem řízeného procesu zadávání tahu, bylo by tak možné přímo porovnávat vypočítanou kvalitu tahu s vlastní analýzou situace uživatelem.

7 Vyhodnocení a závěr

Navržené a implementované řešení adaptace stolní hry Carcassonne zcela splňuje požadavky a očekávání, GUI aplikace poskytuje pohodlné a poměrně intuitivní ovládání, i tak lze nalézt další prostor pro mnohá zlepšení, například zvýraznění tahu, který zvolil hráč s umělou. Nebo estetičtější návrh ztvárnění kartiček a postraních panelů.

Implementace hry je z převážné části připravena převzít některá z rozšíření, své reálné předlohy, a nelze vyloučit ani budoucí implementaci hry více hráčů po síti.

Problematictější je vyhodnocení modulů umělé inteligence (viz 6), zatímco první úroveň modulů až po stochastický výhled vykazují graduální zlepši v herní úspěšnosti, přidání heuristik vede v některých stavech hry na zjevně nesmyslné strategie.

Problém patrně spočívá v mnohoznačnosti, vyplývající v mapování velkého počtu jednotlivých aspektů hry do jedné jediné stupnice kvality, čímž nutně dochází ke ztrátě informační hodnoty. Navíc je optimální nastavení vztahů jednotlivých entit, které se zúčastňují procesu vyhodnocení, téměř nekonečnou kapitolou. Vztahy těchto entit by velmi pravděpodobně vyžadovaly jistou dynamičnost v závislosti na průběhu hry, kde by mohl v rámci budoucích rozšíření existovat prostor pro pokročilé algoritmy umělé inteligence jakou je učení pomocí neuronových sítí.

Z osobního mého pohledu mi byla práce jednoznačně přínosem, i když tomu bylo často za cenu roztříštění původních idealizovaných představ, které neobstály při hlubší konfrontaci s řešenou látkou. Například cesta vývoje aplikace, několikrát kvůli chybám v návrhu skončila na mrtvém bodě, z důvodu podcenění komplexity topologie herní plochy a nárokům, které byly vynuceny jejím provázaností s interaktivním grafickým uživatelským rozhraním.

S jistotou lze říci, že se nyní na původní herní předlohu, dívám s pocitem jistého údivu, avšak nejde zde o údiv ke hře jako takové, je to údiv nad kognitivními procesy lidského vědomí, které právě dojem ze hry jménem Svět umožňují.

Literatura

- [1] A. Benz, G. Jäger, R. van Rooij: Game Theory and Pragmatics. Palgrave Macmillan, 2005;
ISBN 140394521
- [2] F. Zbořil st., F. Zbořil ml., Základy umělé inteligence IZU : Studijní opora, Vysoké učení
technické Fakulta informatiky, v.3 2006
- [3] T. Nash: C# 2010. Computer Press, 2010.
ISBN: 978-80-251-3034-6.
- [4] [online] <<http://boardgamegeek.com/boardgame/822/carcassonne>>
- [5] [online] <<http://msdn.microsoft.com>>

Seznam příloh

Všechny přílohy jsou v elektronické podobě přítomny na přiloženém DVD.

Příloha 1. Manuál k aplikaci hry.

Příloha 2. Aplikace ve spustitelné podobě.

Příloha 3. Instalační balíček *.NET Framework*.

Příloha 4. Zdrojové texty a dokumentace ve formě projektu pro *Microsoft Visual Studio*.