# Efficient Shape Formation by 3D Hybrid Programmable Matter

Modell  
  
Képzeljük el az azonos méretű gömbök szoros elrendezését egy végtelen arccal középpontozott köbös rácson (ez egy olyan struktúra, ahol a gömbök egymáshoz közel helyezkednek el egy szabályos mintábn). Ezt követően létrehoznak egy gráfot (**G = (V, E)**), ahol a csúcsok (V) a gömbök középpontjai, az élek (E) pedig azok a kapcsolatok, ahol két gömb érintkezik egymással. Ezután ezt a gráfot az **R³** térbe ágyazzák be úgy, hogy minden él azonos hosszúságú legyen. Példaként említik a triviális beágyazást, ahol az élhossz megegyezik a gömbök sugarával, tehát a gömbök szomszédai közötti távolság egyenlő.  
Egy aktív ügynököt vizsgálunk **r**-t, amely korlátozott érzékelési és számítási képességekkel rendelkezik G-ben.  
A **G** gráf kettős gráfjában, amely az adott beágyazásra vonatkozik, a cellák formája rombikus dodekaéder lesz. Ez azt jelenti, hogy a cellák olyan poliéderek, amelyek 12 azonos (kongruens) rombusz alakú lapból állnak. A kettős gráf (dual graph) azt jelenti, hogy az eredeti gráf síkjai alapján új cellák jönnek létre, amelyek ebben az esetben rombikus dodekaéderek lesznek.

Egy véges halmaznyi mezőt képzeljünk el, amelyek rombikus dodekaéder alakúak. Ezek a mezők passzívak, ami azt jelenti, hogy nem képesek önállóan számításra vagy mozgásra. Egy **v** csomópont akkor van "burkolva" (tiled), ha egy passzív lap helyezkedik el benne; különben a csomópont üres. Minden csomópontban legfeljebb egy lap lehet, és minden lap csak egy csomópontban lehet egy adott időben. A **V** gráf minden csomópontjának pontosan tizenkét szomszédja van, amelyek helyzete a tizenkét irány szerint van meghatározva, hasonlóan az iránytű irányaihoz.  
Fontos megjegyezni, hogy a **G** gráf a 2D-s változat alapgráfja. Ez lehetővé teszi, hogy a 3D-s példákat vizuálisan úgy ábrázoljuk, mint egy 2D-s hatszög alakú lapokból álló halmazt, ahogy az az 1. ábrán látható.  
Egy **C = (T, p)** konfiguráció az a halmaz, amely tartalmazza az összes burkolt (tiled) csomópontot **T**, valamint az ügynök pozícióját **p**.  
A **C** konfigurációt összefüggőnek nevezzük, ha a **G|T** (vagyis a gráf azon része, amelyet a burkolt csomópontok alkotnak) összefüggő, vagy ha a **G|T ∪ {p}.** Ez röviden azt jelenti egy konfiguráció akkor összefüggő, ha a burkolt csomópontok összefüggő hálózatot alkotnak, vagy ha az ügynök is része ennek, miközben egy lapot hordoz.  
Az ügynök, r, egy korlátozott érzékelési és számítási képességekkel rendelkező entitás, amely passzív csempéken végezhet műveleteket, például csempéket mozgathat. Determinisztikus véges automataként működik a Nézz-Számolj-Mozdul ciklusokban, és megfigyeli saját pozícióját, valamint tizenkét szomszédját. Iránytűje segítségével képes megkülönböztetni ezeknek a szomszédoknak a relatív helyzetét.  
A mozgási fázisban az ügynök egy olyan műveletet hajt végre, amely az előző állapotváltásnak felel meg: mozoghat, csempét helyezhet le, csempét vehet fel, vagy befejezheti a folyamatot.  
Kezdetben egy csempézett csomóponton helyezkedik el, és már hordoz egy csempét. Bár technikailag véges automataként működik, az algoritmusokat magasabb absztrakciós szinten írják le.  
  
Probléma

Egy tetszőleges kezdetben összefüggő konfiguráció, C0 = (T0, p0), esetén, ahol p0 ∈ T, egy algoritmus megoldja a jégcsap formáció problémáját, ha a végrehajtása eredményeként egy összefüggő konfigurációk sorozata jön létre, C0 = (T0, p0), ..., CT = (T0, p0), úgy, hogy a T halmaz csomópontjai jégcsap alakúak (amit alább definiálnak). Minden Ct konfiguráció Ct−1-ből származik 1 ≤ t ≤ T intervallumban az ügynök által végrehajtott műveletek (i)–(iii) egyikének alkalmazásával pt−1-re, és az ügynök a T lépésben befejezi a műveleteket (iv).  
**Mi a jégcsap?** Egy v csomópontnál a v + x az x irányban szomszédos csomópont, míg −x az ellentétes irány, pl. −une = dsw. Egy oszlop az n és s irányban lévő maximális csempesor, egy sor az nw és se irányban, míg egy torony az une és dsw irányban található. A paralelogramma egy maximális egymást követő oszlopokból álló sorozat, ahol a legdélebbi csempék egy sorban helyezkednek el. Egy részben kitöltött paralelogrammában az első oszlop kisebb lehet, mint a többiek.  
A jégcsap egy összefüggő toronyhalmaz, amelynek legfelső csempéi egy (részben kitöltött) paralelogrammában helyezkednek el. A csempék a dsw irányban "nőnek" le a felső paralelogrammából. Bármely csempe, amelynek van une irányú szomszédja, de nincs dsw irányú, eltávolítható anélkül, hogy az összefüggőség sérülne. Ha nincs ilyen csempe (minden torony mérete egy), akkor a legészakibb csempe a legnyugatibb oszlopból eltávolítható.  
  
Algoritmus  
Magas szinten az ügynök iteratívan alakítja át a lokálisan legfelsőbb csempetöredékeket részben kitöltött paralelogrammákká. Ez a csempék átrendezését jelenti az adott rétegen belül, és időnként csempék elhelyezését az alsóbb rétegekben a kapcsolódás fenntartása érdekében. Ha az ügynök felsőbb rétegeken talál csempéket, tovább halad felfelé. Miután egy paralelogramma kialakult, a következő lépés a projekció, amely során minden csempe a dsw irányában lévő első üres csomópontra kerül.