

F-031

## 複雑ネットワークの特徴量に基づくHexゲーム戦略の解析

## An analysis of Hex strategy based on complex network characteristics

本庄 将也†  
Masaya Honjo鈴木 育男†  
Ikuo Suzuki山本 雅人†  
Masahito Yamamoto古川 正志†  
Masashi Furukawa

## 1. 緒言

Hexは簡単なルールの2人用ボードゲームである。六角形を敷き詰めた菱形の盤面を使い、先にこの菱形の対角を自分の駒でつなげたプレイヤーが勝利する。Hexはチェスや囲碁のように戦略的な奥深さがあるゲームとして知られ、コンピュータHexの研究もされている。

Hexの任意の盤の状態は、自身と対戦相手の2つのネットワーク  $N_B(V,E)$  と  $N_W(V,E)$  によって表現可能なことが知られている。各ネットワークは、セルを表すノード集合  $V$  と盤面の端を表す辺ノード  $(s,t)$ 、セルや盤面の端の隣接関係を表すリンク集合  $E$  によって構成される。ネットワーク表現では、勝利条件は自分のネットワークの辺ノード  $(s,t)$  間にリンクが存在すること、または、相手のネットワークの辺ノード  $(s,t)$  間のパスがないこととなる。つまり、自分の辺ノード  $(s,t)$  間の最短パス長が短くなる、または、相手の辺ノード  $(s,t)$  間の最短パス長が長くなるようなネットワーク形状になるように手を打つ戦略が有効であると考えられる。

本研究では、辺ノード  $(s,t)$  間の短いパスに多く寄与するノードの指標として  $k$ -寄与度を定義し、 $k$ -寄与度が高いノードを手として選択する戦略とHexのエキスパートの戦略の関係性を調査する。

## 2. 関連研究

## 2.1 Hexのネットワーク表現

Hexの任意の盤の状態は黒プレイヤーと白プレイヤーの2つのネットワーク  $N_B$  と  $N_W$  に変換することができる<sup>2)</sup>。黒プレイヤーのネットワーク  $N_B$  は次の手順で作成できる。また、白プレイヤーのネットワーク  $N_W$  も同様の手順で作成できる。

1. セルをノードとする。ノード集合を  $V$  とする。
2. 盤上で隣接しているノード間にリンクを追加する。(図2)
3. 向かい合う2つの黒のボードの辺をダミーのノード  $s, t \in V$  と設定し、ノード  $s, t$  と隣接するノードとの間にリンクを追加する。
4. 黒のセルはリンクで接続されているノードを完全グラフにし、そのセルのノードとリンクをネットワークから除去する。
5. 白のセルはそのノードとリンクをネットワークから除去する。

例えば、図1は図3の黒プレイヤーのネットワークと白プレイヤーのネットワークに変換される。

## 2.2 仮想リンク (Virtual Connections)

仮想リンク (Virtual Connections)<sup>3)</sup> とは、Anshelevich が開

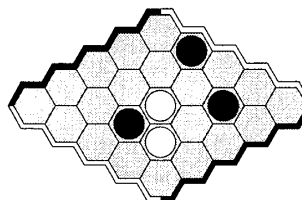


Fig.1 Example 5 × 5 game of Hex.

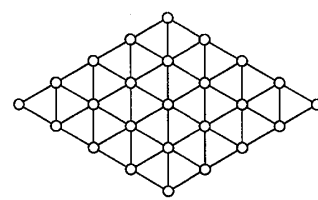


Fig.2 The network which connected adjacent nodes

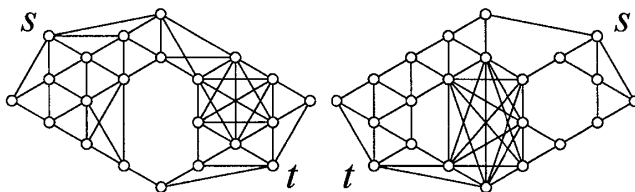


Fig.3 Network representations (Black and White)

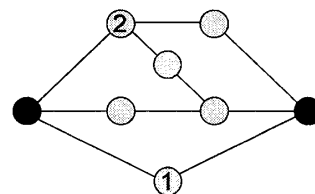


Fig.4 Two black nodes form a virtual connection, which cannot be built using AND and OR deduction rules.

発した、互いに最善手を指せば必ず接続できる2つのセル間を接続する仮想的なリンクである。仮想リンクをネットワークに付加することにより、ネットワークに数手先の盤面の情報を反映させることができる。

仮想リンクの多くは、盤面の状態に AND Deduction Rule (自分のセルに接続されている2つのセル間に仮想リンクを形成するルール) と OR( $n$ ) Deduction Rule (あるセル間の後1手で仮想リンクになる  $n$  本の経路を合わせて仮想リンクを形成するルール) を繰り返し適用することにより発見できる。ただし、この2つのルールを繰り返し適用しても発見できない仮想リンクが存在することも知られている。(図4)

3.  $k$ -寄与度

$k$ -寄与度とはノード  $s$  とノード  $t$  の接続にノード  $u \in V (u \neq s, u \neq t)$  がどの程度寄与しているかを示す指標である。 $k$ -寄与度を定義するために、まず  $k$ -最短パス集合を定義する。

**$k$ -最短パス集合** ノード  $i$  とノード  $j (i, j \in V)$  の最短パス長を  $d(i, j)$  とすると、パス長が  $d(i, j) + k$  より短いノード  $i$  とノード  $j$  間のパスの集合。  $k=0$  の時は最短パスに一致し、  $k=n$  の時はパス長が  $d(i, j)$  のパスと、  $d(i, j) + 1$  のパス、  $\dots$ 、  $d(i, j) + n$  のパスの集合である。

$k$ -最短パス集合を用いると、ノード  $s$  とノード  $t$  の接続に対するノード  $u$  の  $k$ -寄与度  $\delta_{st,k}(u)$  を次の式で定義する。

† 北海道大学大学院情報科学研究科

$$\delta_{stk}(u) = \frac{\sigma_{stk}(u)}{\sigma_{stk}} \quad (1)$$

$\sigma_{stk}$ はノード  $s$  とノード  $t$  の  $k$ -最短パスの数で、 $\sigma_{stk}(u)$  はノード  $s$  とノード  $t$  の  $k$ -最短パスにノード  $u$  が含まれる回数である。ノード  $s$  とノード  $t$  の間に  $k$ -最短パスが存在しない場合は  $\delta_{stk}(u) = 0$  とする。

#### 4. 数値計算実験

仮想リンクを付加したネットワークについて、エキスパートが選択するノードと、そのノードの  $k$ -寄与度の関係を数値計算実験で調査する。

##### 4.1 実験条件

###### 4.1.1 使用するネットワーク

相手の盤面に仮想リンクを付加した状態から2.1の手法で得られるネットワークを用いて実験する。仮想リンクサーチャルゴリズムにはH-searchアルゴリズム<sup>4)</sup>を使用した。

###### 4.1.2 使用するエキスパートの手のデータ

使用するエキスパートの手のデータは Richard Rognlie's Gamerz.NET server 上でされた対戦のうち、以下の条件を満たす22ゲーム分の棋譜とする。

- ・ゲーム盤は  $11 \times 11$  とする。
- ・対戦プレイヤーはこのサーバ上の上位5%以内のプレイヤーである。
- ・先手は必ず黒色の駒を使用する。
- ・ゲームは勝敗がつくまで行われる。つまり、どちらかのプレイヤーが両端を繋いだか、勝利が明らかになるまで続けられる。
- ・このゲームに既知の戦略的な手筋が見られる。

###### 4.1.3 $k$ -寄与度の評価方法

$k$ -寄与度によるノードのランク付けをしたときにランクが上位のノードほど重要なノードであると考え、勝利したエキスパートの手が上位のノードとどの程度一致するかで評価する。

**ランク関数  $R\delta(k, u, N)$**  ランク関数  $R\delta(k, u, N)$  をネットワーク  $N$  の全てのノードの  $k$ -寄与度  $\delta_{stk}(v)$  を計算し、ノード  $u$  の  $k$ -寄与度  $\delta_{stk}(u)$  の順位を返す関数とする。その値域は  $1 \leq R\delta(k, u, N) \leq n$  ( $n$ : ネットワークのノード数) の整数である。

**評価  $E$**  評価  $E$  は  $R\delta(k, u, N)$  にエキスパートの手  $v^*$  が代入された時の  $R\delta(k, v^*, N)$  を正規化した値であり、次の式で表される。

$$E = 1 - \frac{R\delta(k, v^*, N) - 1}{n - 1} \quad (0 \leq E \leq 1) \quad (2)$$

評価  $E$  は、ある盤面において  $k$ -寄与度がランク付けした結果とエキスパートが選んだ手がどれ程違うか評価している。 $E = 0$  のときにエキスパートは最下位のランクのノードを選択し、 $E = 1$  のときに1位のランクのノードを選択している。

##### 4.2 実験結果

22ゲーム分の仮想リンクを付加したネットワークを用いた時の1-寄与度の評価  $E$  をターン数ごとにプロットしたグラフを図4に示す。また、 $k = 0$  の場合は図4より  $E$  が低い

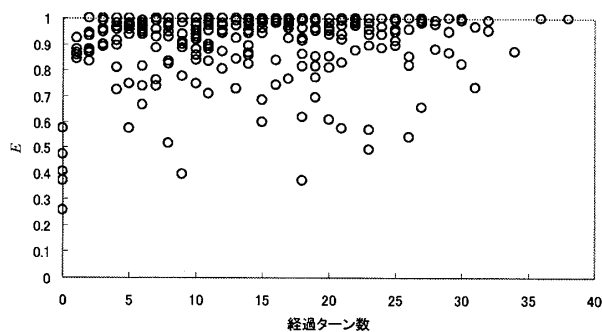


Fig.5 Evaluation  $E$  of 1-contribution when network where virtual connections were added is used

場合が多く、 $k = 2$  の場合は図4と大きな違いは見られなかった。

##### 4.3 考察

図5より、多くの場合、評価  $E$  は高い位置に集中しているがわかる。しかし、評価  $E$  が低くても選択する価値のある手が存在することがわかる。原因としては以下が考えられる。

- ・相手のネットワークでは重要ではないが、自分のネットワークで重要なノードを選択している。
- ・エキスパートが必ずしも最良手を選択していない。
- ・仮想リンクを付加したネットワークと1-寄与度の組み合わせでは表しきれない、エキスパートの手の特徴が存在している。
- ・後半の攻めの布石となるセルを取っている。

#### 5. 結言

本研究では、Hexの状態をネットワークとして考え、辺ノード  $(s, t)$  間の距離を効率よく縮めるために、 $k$ -最短パス集合上の媒介性を表す特徴量である  $k$ -寄与度を提案した。

次に、エキスパートの手と、仮想リンクを付加したネットワークの  $k$ -寄与度が推薦する手との違いを評価し、エキスパートの手は  $k$ -寄与度のランクが高いセルを選択する傾向があることを示した。

また、 $k$ -寄与度が低くても選択する価値のある手が存在することがわかった。

今後の課題として、評価値が低くても選択されるノードの特徴を調べ、さらにエキスパートの手を良く表す特徴量を開発する事や、その特徴量を評価関数としたHexプログラムの開発が挙げられる。

#### 参考文献

- 1) Camerun Browne. *Hex Strategy: Making the Right Connections*. A K Peters Ltd, illustrated edition, May 2000.
- 2) Jack van Rijswijk. Search and evaluation in hex. Technical report, 2003.
- 3) Vadim V. Anshelevich. The game of hex: An automatic theorem proving approach to game programming. In *Proceedings of the Seventeenth National Conference on Artificial Intelligence and Twelfth Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence*, pp. 189–194. AAAI Press / The MIT Press, 2000.
- 4) V. Anshelevich. A hierarchical approach to computer hex. *Artificial Intelligence*, Vol. 134, No. 1-2, pp. 101–120, January 2002.