BW Graph Modelに基づく局面評価の一般形とその自動生成

佐 藤 真 史† 穴 田 浩 一†† 堤 正 義†

囲碁の局面評価には様々な種類があり，そのために用いる特徴も同様である．一局を通して利用できる評価関数の構築には，それらを同じ形式で表せる必要がある．本論文で提案する評価写像の一般形のモデルである戦術写像は，xy 座標表現や石同士の相対位置，また連のダメ数など多岐にわたる特徴をグラフ理論の価数などを用いることで同一の演算で表現する．さらに，そのモデルの応用の一つとして，特徴の自動生成アルゴリズムを構築し，その有用性を検証する．

A system of positional evaluations based on BW Graph Model and automatic evaluation construction

Masafumi Satou,† Koichi Anada†† and Masayoshi Tsutsumi†

There are various kinds of positional estimations and features in the game of Go. Construction of the estimation which can be used through the whole requires the model which represent any features in the same form. In this paper, we propose a system of positoinal evaluations called *Tactical Mapping*. It can represent xy coordinates, relative position between intersections, the number of dame and so on by the same operators with degrees in the graph theory. And we propose an automatic evaluation construction with the tactical mapping.

1. 研 究 目 的

本研究は，囲碁の定石や手筋，さらには棋風などの曖昧な対象の数理化を目標としており，こういったさまざまな特徴を表現するための，単純で汎用的な一般形の構築は必要不可欠である．本論文では特に着手の持つ特徴の抽出を目的とする．着手は対局者が局面を評価し，他とは違うと結論付けた交点である．この着手と他の交点を識別することができる事を持って提案するモデル，戦術写像の表現力の証明とする．

ゲームの局面から適切な情報，特徴を取り出すことは重要である．特に囲碁というゲームは図形的であり，石の配置は意味のないものから重要なものまで，また一目見て分かるものから複雑な計算を必要とするものまで様々な特徴を持つ．また対局の進行具合や場所によって有効な評価方法が大きく異なる，

序盤では，考慮すべき石が少なく定石どおりに打つことが重要となる．そのため，Stern, Herbrich, Graepel[1] のような定石の座標位置をパターンとする手法が有効である．また各石を基準とした Tajima, Sanechika[2] のような距離による評価方法も有効である．特に布石の段階では，各交点は４隅からの位置で特徴付けられる．

一方，中盤以降では石が増え，小さいものでないと同じパターンの出現が減り，小さいパターンだけになると周囲の情報を十分に利用できない．また石同士の距離が近づき，４隅や端，石同士の距離よりも，周囲の石の配置形状の方が重要となる．特に最終盤では，個々の状況が独立に評価でき，Benson[3] のような手法が有効になる．この場合のパターンは，回転と反転以外にも同値となる変換がある．例えば３目中手は直線形とＬ字形で区別する必要がない．そのためパターンは連単位やグラフとして表現したほうが効率がよい．

そして実際の対局者は，上記のような特徴を組み合わせて利用している．そのため，着手の解析をするにはこれらの特徴を同一の形式で表現していく必要がある．以上のことを踏まえ，我々が提案する評価写像の一般形，**戦術写像**には次の３つの特長がある．１つは局面をグラフとして扱うこと．これにより図形を分類しやすくなり，また局面の形状に依存しないため，任意の形の部分局面を用いることができる．２つ目は，連接辺という向きつき辺の導入により，連と交点，両方が表せるということ．そして３つ目は，各特徴を演算子による二分木で表すことで，計算の簡単な特徴か

† 早稲田大学
Waseda University
†† 早稲田大学高等学院
Waseda University Senior High School

ら複雑なものまで表現可能なことである．

本論文の構成は，２章で戦術写像に用いる各演算の定義を順に行って上で，戦術写像の使用例として着手による連の変化や座標の表現方法を紹介する．続く３章で特徴の自動生成方法を提案し，４章でまとめる．

2. 戦術写像

戦術写像は，次に示す演算子の組み合わせによる局面から盤上の交点集合への写像として定義される．使用する演算子は大きく分けて３種類ある．

１つ目は集合演算で，和集合 $\cup$，積集合 $\cap$，差集合 $-$，補集合 $\overline{\ }$ を用いる．また，表記の簡便化のため $(A-B)\cup(B-A)$ を排他的論理和 $\oplus$ を用いて $A\oplus B$ と略記する．

２つ目は局面から指定した状態の交点集合を得る黒空集合 B と白空集合 W の２つの演算であり，３つ目は局面と指定した交点集合から交点集合を計算する点接 Adj_n，連接始点 Pre_n，連接終点 Suc_n の３つである．

2.1 交点の状態に関する演算

囲碁では，各交点は { 黒石がある，白石がある，石が無い } の３状態のいずれか一つを取り，それぞれ黒，白，空と表記する．３つしかないため，次の２つの演算で表現することが出来る．

$$B(c) = \{x|\ x\ is\ a\ black\ or\ empty\ on\ c.\}$$
$$W(c) = \{x|\ x\ is\ a\ white\ or\ empty\ on\ c.\}$$

ここで c は一つの局面を表し，B は黒と空の交点を，W は白と空の交点を取り出す演算である．局面 c の黒である交点集合，および白，空の交点集合はそれぞれ B と W を用いて，

$$BLACK(c) = B(c) - W(c)$$
$$WHITE(c) = W(c) - B(c)$$
$$EMPTY(c) = B(c) \cap W(c)$$

と書け，盤上の全ての交点からなる集合は

$$ALL(c) = B(c) \cup W(c)$$

で表せる．

$B(c)$，$W(c)$ は局面 c 上の交点集合と考えることも出来るが，本モデルでは局面から交点集合への写像または局面を交点集合に変換する演算として扱う．

2.2 ２交点の関係の定義

囲碁では，同色の石が上下左右の隣接に基づき一つの連結集合を形成するとき，その集合を連と呼ぶ．この連は囲碁をする上で重要な意味を持ち，往々にして交点単位ではなく，この連単位で局面を評価する．まず隣接と連をそれぞれ二項関係により定義する．

盤上の交点は上下左右の隣の交点とつながっている

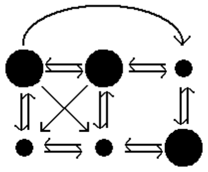

図 1　連接辺の例．ループ辺は省略した．

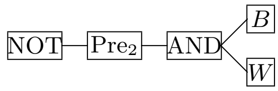

図 2　２分木表示の例．図は $H = \overline{\mathrm{Pre}_2(B \cap W)}$

とされる．このことを，隣接関係 N_c を用いて次のように表現する．

> 局面 c 上の２交点 u と v が同じまたは隣接しているとき，またそのときに限り uN_cv が成り立つ．

尚，N_c は反射律 $\forall u \in B(c) \cup W(c), uN_cu$ を満たす．これは例えば $N_c^2(u) = \{w|\exists v, uN_cv, vN_cw\}$ と表した際に N_c^2 が交点 u の２つ隣だけでなく u 自身も含んでしまうことを踏まえ，N_c^2 が２つ以下隣となるようにしたためである．２つ隣の交点のみが欲しいときには，$N_c^1(u) = \{w|uN_cw\}$ とし，$N_c^2(u) - N_c^1(u)$ で得る．

連に関しては，次の連関係 M_c を用いて表現する．

> 局面 c において２交点 u,v が次の少なくともどちらかを満たすとき uM_cv が成り立つ．
> - u と v が同じ交点である．
> - u と v が同じ状態でかつ空点でなく，u, v 間に N_c による u，v と同じ状態の交点からなる経路が存在する．

交点 u から交点 v まで同じ色の石を通って到達できるとき uM_cv とし，u と v は同じ連に含まれているとする．連関係は同値関係である．一般的に空である交点は連を作らないが，連関係の定義上，常に１交点で１つの連とし，連関係による交点集合の商集合の元を連と呼ぶ．図１では，黒の連が２つ，空の連が３つある．

2.3 隣接と連に基づく演算

本手法では局面をグラフとして扱い，隣接に基づく隣接辺と連を考慮した連接辺の２種類の辺を導入する．

隣接辺は，隣接する２交点をつなぐ辺である．局面 c に依存する交点から交点集合への写像 F_0 で定義する．

$$F_0(x)(c) = \{y \mid xN_cy\}$$

$y \in F_0(x)(c)$ であるとき，交点 x と交点 y は隣接関係にあり，定義より $x \in F_0(y)(c)$ も成り立つ．$y \in F_0(x)(c)$ が成り立つとき，x と y を結ぶ隣接辺は１本とし，$\overline{xy}$ と $\overline{yx}$ は同一の隣接辺とする．また全ての交点は自身を両端とするループ辺 $\overline{xx}$ を持つ．隣接関係 N_c および隣接辺 $F_0(\cdot)(c)$ は盤の形状のみに依存

し，石の配置で変化することは無い．

連接辺 F は，連の各交点から同じ連の交点 (自身を含む) とその周囲の交点への向きつき辺である．連接辺 F は交点から交点集合の写像の形で以下のように定義する．

$$F(x)(c) = \{y \mid {}^{\exists}z; (xM_c z \wedge kN_c z)\}$$

$F(x)(c)$ は，交点 x を含む連とさらにその一つ隣まで含む交点集合である．連接辺は対称律が成り立たず，$y \in F_c(x)$ であるとき連接辺 $\vec{xy}$ は交点 x を始点とし交点 y を終点とする向きつき辺となる．一方で任意の交点 x，局面 c で $F_0(x)(c) \subset F(x)(c)$ が成り立ち，x が１交点からなる連のとき，特に空であるとき $F_0(x)(c)$ と $F(x)(c)$ は一致する．$y \in F(x)(c)$ と $x \in F(y)(c)$ が成り立つとき，x と y の間には，$\vec{xy}$ と $\vec{yx}$ の向きの違う２本の連接辺が存在する．$F_0(x)$，$F(x)$ は B，W と同じく局面 c から c 上の交点集合への写像である．

１つの局面が与えられたときその局面 c における連接辺 F を得るには，連関係 M_c を各２交点の組に対して得る必要があり，これには経路の探索が必須である．しかし，佐藤，堤[4] から一つ前の局面における連接辺から漸化式の形で導けることが分かっており，その場合は経路探索のプロセスは必要ない．実際の対局では直前の局面は必ず既知であり，詰め碁などでは問題図のみ計算すればよいため，本モデルでは連の導出に関して経路探索アルゴリズムを必要としない．

$F_0(\cdot)(c)$ と $F(\cdot)(c)$ は交点から交点集合への写像だが，これを拡張して次の価数に基づく３つの交点集合から交点集合への写像，点接 Adj_n，連接始点 Pre_n，連接終点 Suc_n を次のように定義する．

$$\mathrm{Adj}_n(A)(c) = \{x \mid |F_0(x)(c) \cap A| \geq n\},$$
$$\mathrm{Pre}_n(A)(c) = \{x \mid |F(x)(c) \cap A| \geq n\},$$
$$\mathrm{Suc}_n(A)(c) = \{x \mid |F^{-1}(x)(c) \cap A| \geq n\}$$

ここで A は局面 c 上の任意の交点の部分集合，$|\cdot|$ は集合の要素の数である．また $F^{-1}(x)(c) = \{y \mid x \in F(y)(c)\}$ とした．n は任意の自然数であるが，ここでは１交点の隣接する交点の数から１以上５以下とする．

$x \in \mathrm{Pre}_n(A)(c)$ は，局面 c 上で交点 x から A 内の交点に向けての n 本以上の連接辺があることを意味する．同様に，$x \in \mathrm{Suc}_n$ は A から x への連接辺が，$x \in \mathrm{Adj}_n$ は A と x を結ぶ隣接辺が n 本以上存在することを意味する．$\mathrm{Pre}_n(A), \mathrm{Suc}_n(A), \mathrm{Adj}_n(A)$ も，同様に局面から交点集合の写像である．

2.4　写像一般形の定義

本モデルにおける写像の一般形は，その形から

０項演算　黒空集合 B，白空集合 W

１項演算　補集合 $\bar{\cdot}$，連接始点 $\mathrm{Pre}_n(\cdot)$，連接終点 $\mathrm{Suc}_n(\cdot)$，点接 $\mathrm{Adj}_n(\cdot)$

２項演算　和集合 $\cup$，積集合 $\cap$，差集合 $-$

の３種類に分類できる．０項演算は $f : c \mapsto A$ という局面 c から交点集合 A の形で書け，１，２項演算はそれぞれ $g_1(X) : c \mapsto A$，$g_2(X, Y) : c \mapsto A$ の形で，局面 c と１または２個の交点集合を別の交点集合へ写す．これらを次の形で組み合わせることで局面から交点集合への写像の一般形とする．(論理演算は局面によらないが形式上 c を変数として持つとする．)

定義

$$\mathcal{F}_1 = \{B, W\},$$
$$\mathcal{G}_1 = \{\bar{\cdot}, \mathrm{Pre}_n, \mathrm{Suc}_n, \mathrm{Adj}_n\},$$
$$\mathcal{G}_2 = \{\cup, \cap, -\},$$
$$\mathcal{F}^1_{n+1} = \{g^1(f) | g^1 \in \mathcal{G}_1, f \in \mathcal{F}_n\},$$
$$\mathcal{F}^2_{n+1} = \{g^2(f_1, f_2) | g^2 \in \mathcal{G}_2, f_1, f_2 \in \mathcal{F}_n\},$$
$$\mathcal{F}_{n+1} = \mathcal{F}^1_{n+1} \cup \mathcal{F}^2_{n+1}.$$

$\mathcal{F}_n$ を**深度 n 以下の戦術写像**と呼び，$\mathcal{F}_\infty$ を**戦術写像**と呼ぶことにする．$g^1(f)$，$g^2(f_1, f_2)$ はそれぞれ，$g^1(f)(c) = g^1(f(c))(c)$，$g^2(f_1, f_2)(c) = g^2(f_1(c), f_2(c))(c)$ という局面から交点集合への写像である．

戦術写像は２分木の形で表すことが出来る．つまり，１および２項演算は１つ，または２つの子ノードをもつノードとして，０項演算は子ノードを持たないノードとなる．たとえば，$EMPTY = B \cap W$ は，根を $\cap$，その子ノードとして B，W ２つの葉をもつ２分木である（図２参照）．深度は２分木の根から最遠の葉までの長さである．

2.5　適　用　例

戦術写像は単純な演算の組み合わせで作れ，また演算を増やすことで複雑な特徴にも対応できる．次では例として，着手可能な交点と着手により変化する連，４隅とそこからの xy 座標表現を紹介する．

BW Graph モデル[4] は，戦術写像の元となったモデルである．その中の式は全て戦術写像となっており，黒の着手可能な交点 R_B，着手した交点を含む連 (増える，または拡大する連はこの連一つである)a_B，取られる連 d_B がそれぞれ

$$R_B = \mathrm{Suc}_1(B \oplus H)$$
$$a_B = (\mathrm{Pre}_1(\{x\}) - W) \cup \{x\}$$
$$d_B = (\mathrm{Pre}_1(\{x\}) \cap H) - B$$

と書けることが分かっている．ここで x は着手した交点であり，H はアタリ集合と呼ばれ $\overline{\mathrm{Pre}_2(B \cap W)}$ で表される．H は連接する交点のうち空であるものが一つしかない交点の集合で，アタっている連と周囲を石

に囲まれた空点からなる.(ルール上，連接する交点に少なくとも一つは空がある.）これにより，相手の目に打つものと自分の石のダメを詰める自殺手の両方，そして相手の石を取ることによる合法手を同時に表現できる．また a_B の式から分かるとおり，増えた連に関して連結性の再確認が必要ない.

他にも戦術写像は，端からの距離のような絶対座標や２交点の相対位置も表現できる．例えば四隅からの位置 (n, m) は次の式で表せる.

$$\mathrm{Adj}_1^{n+m}(\overline{\mathrm{Adj}_4(X)}) - \mathrm{Adj}_1^{n+m-1}(\overline{\mathrm{Adj}_4(X)}) \\ \cap(\mathrm{Adj}_1^{n}(\overline{\mathrm{Adj}_5(X)}) - \mathrm{Adj}_1^{n-1}(\overline{\mathrm{Adj}_5(X)}))$$

ここで，$\mathrm{Adj}_1^n(\cdot) = \mathrm{Adj}_1(\mathrm{Adj}_1^{n-1}(\cdot))$，$\mathrm{Adj}_1^1 = \mathrm{Adj}_1$，$X = B \cup W$，また $n < m$ とした．４隅および上下左右の端は隣接する交点の数で特徴付けられ，それぞれ $\overline{\mathrm{Adj}_4(X)}$ と $\overline{\mathrm{Adj}_5(X)}$ で表せる．そして１行目は隅から n+m の距離にあることを，２行目は端から n の距離にあることを意味する．碁盤は回転と反転に対し対称である．本式は同値な交点を全て返すため，対角線上は４つ，他は８つの交点からなる交点集合を返す.

本モデルは，連単位の表現だけでなく，ダメ数による区別や座標に関する特徴も表すことが出来，序盤から終盤までの着手の特徴を同一の形式で表現できる.

3. 棋譜からの着手の持つ特徴の自動生成

戦術写像は先に述べた演算子を繋げるだけなので，新たな特徴の生成が容易である．深度に上限を設けることで大きさを制限し，各ノードにランダムで演算子を設定すればよい．表１にアルゴリズムを示す.

SET_OPERATOR は，指定したノードに演算子をランダムで一つつける関数であり，*size* が０の時はそれ以上大きくならないように０項演算子をつける．*SET_CHILD* はノードに付与された演算に応じて子ノードを増やす関数である．初期値として，最大の最大を指定する．そして，根ノード *root* に最初の (演算的には最後に行う) 演算子を入れ，その種別ごとに子ノードを追加していく.

佐藤，穴田，堤[5] の結果から，プロの棋譜の各局面における着手を他の交点と識別出来るだけの特徴を生成できることが確認できている．これは，局面が与えられたときに，戦術写像の中に局面から着手ただ１つ，またはそれと反転回転などで同一の交点からなる交点集合への写像が存在することを意味する.

4. ま と め

戦術写像は，局面を平面として捉えたときの座標表示とグラフとして捉えたときの連結性による連単位の表現，およびその周囲の状態（ダメ数など）を同一の演算で表すことが出来るモデルである．また，実際の着手の特徴を抽出できることも確認できた.

着手予測に関してはまだ未実装であるが，そのためには着手と他の交点の違いだけでなく，１局面と他の局面の違いに関する特徴の抽出も必要と考え，現在製作中である．今後は，着手予測や着手解析の研究を進めていく予定である.

```
SET_OPERATOR(node, size)
 IF size = 0 THEN
  node ← one of operators in 𝓕1 at random
 ELSE
  node ← one of operators in 𝓕1 ∪ 𝓖1 ∪ 𝓖2 at random
 END IF
EXIT

SET_CHILD(node, size)
 IF the operator of node is in 𝓖1
  SET_OPERATOR(node,size), SET_CHILD(node,size-1)}
 END IF  IF the operator of node is in 𝓖2 then
  SET_OPERATOR(node,size)
  SET_CHILD(node,size-1)
  SET_CHILD(node,size-1)}
 END IF
EXIT

s=maxsize
SET_OPERATOR(root, s)
SET_CHILD(root, s)
RETURN root
```

表 1 写像のランダム生成アルゴリズム

参 考 文 献

1) Stern, D., Herbrich, R. and Graepel, T.: Bayesian Pattern Ranking for Move Prediction in the Game of Go, *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*, pp.873–880 (2006).
2) Tajima, M. and Sanechika, N.: Estimating the Possible Omission Number for Groups in Go by the Number of n-th Dame, Vol.1558, pp.265–281 (1999).
3) Benson, D.B.: Life in the Game of Go, *Information Sciences*, Vol.10, pp.17–29 (1976).
4) 佐藤真史，　堤正義：囲碁における数学的構造の解析，日本応用数理学会年会予稿集，日本応用数理学会，pp.343–344 (2008).
5) 佐藤真史，　堤正義，穴田浩一：B-W Graph Model による棋譜からの着手の機械学習と対局者の思考過程，着眼点の解析，情報処理学会全国大会講演論文集（２），情報処理学会，pp.2–93–2–94 (2013).