

評価指標間の相関に基づく局面の難易度推定

竹内 章^{†1} 鵜木祐史^{†1} 飯田弘之^{†1}

プロ棋士レベルの柔軟な戦略や芸術性評価の実現には、エキスパート特有の何らかの評価指標が関与しているものと想定される。そのような評価指標の有力候補として、局面の難易度があげられる。本稿では、将棋を題材とした局面の難易度推定のために、ゲーム木のリーフノードにおける評価値の正/負の比率を計測し、カルマンフィルタを用いて解析する手法を提案する。提案手法を用いてプロの棋譜を解析した結果、ルートノードとリーフノードの評価値の相関係数に着目することで、局面の難易度を推定できることを確認した。

Estimation of Position Complexity based on Correlation between Evaluation Factors

AKIRA TAKEUCHI^{†1} MASASHI UNOKI^{†1} HIROYUKI IIDA^{†1}

To realize the professional level of flexible strategies and artistic assessments, some evaluation factors specific to experts are assumed to be involved. A position complexity has potential as such evaluation factors. For an estimation of position complexity in shogi, we propose methods for measurement of positive/negative ratio of evaluation value at leaf nodes in a game tree and analysis using Kalman filter. As a result of analyzing some professional game records using the proposed methods, the position complexity can be estimated based on the correlation coefficient between evaluation values at the root node and leaf nodes.

1. はじめに

コンピュータ将棋においては、評価値という単一の指標を用いて局面を評価することが一般的である。しかしながら同じような優勢な局面であっても、優勢を拡大していくことが容易な局面と、一手間違えると逆転される危険をはらんだ局面などがある。また、現局面の評価値だけでなく、そこへ至る経緯やトレンドも重要な指標であると考えられる。同程度の有利な評価であっても、互角から急に上昇した場合はそのまま勝ちきれれるケースが多いが、優勢から下がってきた場合は逆転される可能性が高い。

一方、プロ棋士の特に名局と評される棋譜においては、一局を通して難解な局面が続いていると考えられる。逆に、容易に負けあるいは引き分けが判断できる局面になれば、終了させる判断をするであろう。したがって、局面の難易度を評価できれば、投了識別や名局判定にも応用できることが期待される。

ある局面を探索したとき、評価値が有利な場合には探索したリーフノードの評価値も当然有利なことが多いと思われる。しかしながら、逆に不利な局面が多い場合には、局面評価を誤ったり最善手を逃したりした際、探索結果としての評価値が大きく変動する可能性がある。本研究では、局面の難易度を推定するために有力と考えられる、リーフノードにおける評価値の正/負の比率を計測し、カルマンフィルタを用いて解析する手法を提案する。評価指標の傾向を捉えるため、その変化速度や加速度も推定する。いく

つかのサンプル棋譜を解析した結果を考察し、この指標の活用方法について議論する。

2. 関連研究

詰将棋の難易度を示す指標として、証明数・反証数がある。mini-max 木において評価値が変わるのに必要なノード数で安定性を示す共謀数[1]をAND/OR 木に適用すると、証明数・反証数の概念が出てくる[2]。証明数（反証数）は、ある局面の評価を true (false) にするために true (false) となることを示さないといけな局面数の最小値と定義される。証明数は詰みを、反証数は不詰を示すための難易度の良い指標となり、これらが小さくなるような手順を優先的に探索することにより、長手数詰み手順でも発見できるようになった[3]。また、詰将棋の優秀な作品においては証明数に特徴的な推移が見られることが示されるなど、詰将棋問題の感性評価への応用も研究されている[4]。

mini-max 木に対しては、 α - β 探索のウィンドウを有利な側のみにした探索における有効分岐因子が終盤局面の難解さを表しており、プロ棋士の投了局面の識別に有効なことが示された[5]。この探索においては、手番側の評価値が負のノードは枝刈りされ有利な局面のみが探索されるため、探索ノード数は勝ちがないことの証明数と関係があると考えられる。証明数の計測に比べればこの探索は容易であるが、有効分岐因子の定量的な値を統一させるため探索延長などを排除する必要があり、性能を低下させる要因になった。投了局面の識別のようなプロ棋士の思考を解明するには、それに匹敵する思考が必要であり、性能低下を補うために探索量を増加させる必要があった。

^{†1} 北陸先端科学技術大学院大学
Japan Advanced Institute of Science and Technology

3. 局面の難易度の解析

3.1 棋譜からの計測方法

リーフノードにおける評価値の正/負の比率を計測する方法は、探索アルゴリズムに依存せず、ほとんどの将棋プログラムで簡単に実装することができる。本研究で計測に用いた「習甦」では、リーフノードにおいて評価関数を呼び出す際にノード数のカウントを行っており、そこで評価値の正/負の判定をするだけで済む。なお、評価値が 0 の場合には、手番が先手の場合は負、後手の場合は正とした。

対象とする棋譜について、初期局面から棋譜の指し手により進められた局面を順次探索させる。各局面における探索は、基本深さの最大値を 30 手とし、探索ノード数が 2^{30} になると打ち切ることとする。これは、持ち時間 4~5 時間の対局における平均的な考慮時間で探索できるノード数に相当する。探索ノードで厳密に打ち切るのは探索途中の指し手に続く読みが無駄になるようであるが、トランスポジションテーブルはクリアせずに利用するため、次の局面での読みの効率化に寄与する。

3.2 カルマンフィルタによる時系列解析

前述した計測方法によって、探索によって得られたルートノードの評価値と、リーフノードにおける評価値の正/負の比率とが、棋譜にしたがい進められた各局面における推移として得られる。これら二つの指標の計測値には、局面評価関数や探索打ち切りなどを要因とする誤差を含む。そこで、カルマンフィルタを用いて、誤差の分散を最小にする評価値とその平均変化率（以後、変化速度と呼ぶ）および変曲点の変化（以後、加速度と呼ぶ）を推定する。

評価値 x は、次式によって勝率などの比率 $r(x)$ に変換することができる。

$$r(x) = 1/(1 + \exp(-x/T)) \quad (1)$$

ここで、 T は局面評価関数により相違が生じる定数であり、習甦においては $T = 256$ に調整されている。式(1)により、二つの計測値を比較可能な指標へ相互に変換可能である。ここでは、リーフノードにおける比率 r の方を次式によって、評価値相当の値 $x(r)$ に逆変換して状態変数とする。

$$x(r) = -T \ln(1/r - 1) \quad (2)$$

以降では、この変換された値をリーフノードの評価値と呼ぶ。比率の方を変換する理由は、カルマンフィルタの適用においてはプロセスノイズと観測ノイズを設定する必要があり、比率には設定する目安がないためである。一方、評価値ベースの値を状態変数にする場合、浅い深さの探索結果と深い深さの探索結果との分散などから観測ノイズを見積もることができる。習甦においては、この分散を予め計測しており、局面全体の利きの評価から算出される安定度に応じたマージンを枝刈りなどのために設定できるようにしている[6]。このマージンから局面に応じた観測ノイズ

を設定することができる。

以下に説明するカルマンフィルタの適用において、通常の間隔は手数に対応する。手数 Δt ごとに局面の探索を行うとし、棋譜から一手ごとに探索する場合は $\Delta t = 1$ となる。その他、対局中に自分の手番においてのみ探索する場合は $\Delta t = 2$ となる。

ある局面 k の評価値とその変化速度および加速度を、状態変数ベクトル X_k とする。 X_k は、状態変数 x_k 、その手数微分 \dot{x}_k 、状態変数の手数での 2 階微分 \ddot{x}_k からなる。状態方程式は、 Δt 前の局面 $k-1$ の状態をもとにして式(3) - (7)で表される。

$$X_k = FX_{k-1} + Gw_k \quad (3)$$

$$X_k = [x_k \quad \dot{x}_k \quad \ddot{x}_k]^T \quad (4)$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$G = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

$$w_k \sim N(0, Q_k) \quad (7)$$

ここで、状態変数に与えられる加速度にはノイズ w_k が含まれ、 w_k は分散 Q_k の正規分布に従うものと仮定する。

ある局面の観測値あるいは評価値ベースに変換された値を y_k とすると、観測方程式は式(8) - (10)で表される。

$$y_k = HX_k + v_k \quad (8)$$

$$H = [1 \quad 0 \quad 0] \quad (9)$$

$$v_k \sim N(0, R_k) \quad (10)$$

ここで、 v_k は観測ノイズであり、分散が R_k の正規分布に従うとする。これら分散の値は、前述した通り局面に対応したマージンの値から設定する。

以上のように適用されたカルマンフィルタを用いると、以下の通り解析される。局面 $k-1$ の時点での局面 k の状態推定値を $X_{k|k-1}$ 、推定値の精度である誤差の共分散行列を $P_{k|k-1}$ とすると、カルマンフィルタの予測は式(11) - (12)で表される。

$$X_{k|k-1} = FX_{k-1|k-1} \quad (11)$$

$$P_{k|k-1} = FP_{k-1|k-1}F^T + GQ_kG^T \quad (12)$$

さらに、観測残差 e_k 、観測残差の共分散 S_k 、カルマンゲイン K_k により、式(13) - (17)の通り更新される。

$$e_k = y_k - HX_{k|k-1} \quad (13)$$

$$S_k = R_k + HP_{k|k-1}H^T \quad (14)$$

$$K_k = P_{k|k-1}H^TS_k^{-1} \quad (15)$$

$$X_{k|k} = X_{k|k-1} + K_k e_k \quad (16)$$

$$P_{k|k} = (I - K_k H)P_{k|k-1} \quad (17)$$

以上の予測と更新とを、局面の進行に従い繰り返して解析を行っていく。なお、ルートノードの評価値とリーフノードの評価値の間には当然相関があるが、その関係を定式化することは難しいため、ここではそれぞれ独立に解析する。

3.3 相関係数による難易度の推定

二つの指標間の相関が弱い場合、例えば最善応手手順後の局面は優勢にもかかわらず探索中にリーフノードの評価においては不利な局面も多い場合には、局面評価の誤算や最善手を逃すことにより評価値が変動する難解な局面であると考えられる。局面の難易度を推定する方法として、二つの指標間の相関分析を行う。

一局を通しての相関係数を求めることに加え、何局面かに限定して相関係数の推移を分析することを考える。計算する局面数が少ないと相関係数の信頼度が低下し、局面数を多くすると急な変化を捉えることができなくなる。今回は15手先の局面までの16局面を計算対象とし、終局近くでは先の局面があるまでとした。このため、以降で説明する解析結果においては、終局近くで相関係数の誤差が大きくなる点に注意されたい。

4. サンプル棋譜の解析結果

4.1 第62期名人戦第1局

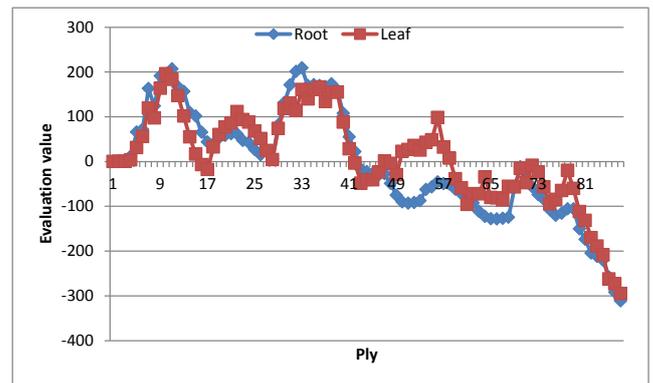
まず、トッププロ棋士同士の棋譜を解析する。本局は、投了識別の研究において、特異であり識別が困難な投了の例として示された[5]。駒の損得は「金」と「銀、歩」の交換でほとんどなく、相手陣にある駒は最終手で打った△6七金のみで後手は持駒もない局面において、先手が投了している。

図1(a), (b), (c)に、状態変数とその変化速度および加速度について、手数で示される棋譜の進行に対する推移を示す。各図において、ルートノードの評価値 (Root) とリーフノードの評価値 (Leaf) とを比較して示している。

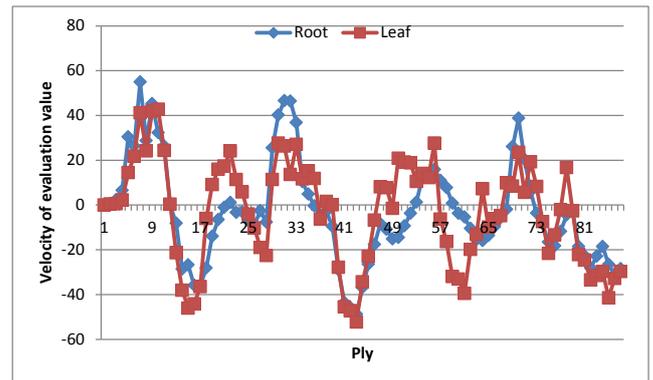
序盤と終盤においては、ルートノードとリーフノードの評価値は同じような変化を示している一方で、中盤の一部の期間においてのみ違いが見られる。終局近くに注目すると、評価値の変化速度が正の値になることは、72手目以降においてルートノードには無く、リーフノードにも僅かである。また、加速度でみると、79手目以降は負の値を示しており、後手が良くなる流れは止められなくなっていることが分かる。

図1(d)には、ルートノードとリーフノードの評価値の相関係数の推移を示す。終局近くの変化速度・加速度に乱れが生じている理由は、前述した通り相関係数の計算に用いる局面数が減少するためである。なお、相関係数は対象局面が8以上ある局面についてのみ表示している。

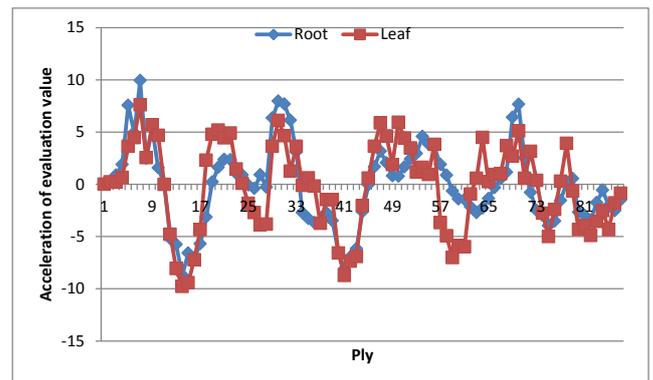
中盤に相関係数が低下した後、終局に向けて上昇し続けて1に近づいており、判りやすい局面になったため投了したと考えられる。以上より、二つの評価指標間の相関係数が棋士固有の閾値を超えることを条件とするなど、相関関係およびその傾向に着目することによって、これまで説明しきれなかった投了の理由を明確に示すことができる可能性がある。



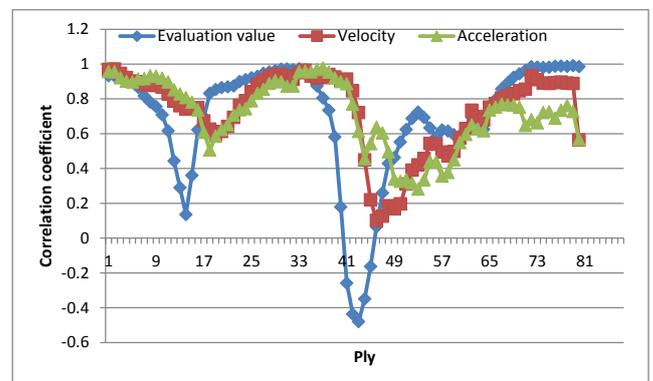
(a) Evaluation value.



(b) Velocity of evaluation value.



(c) Acceleration of evaluation value.



(d) Correlation coefficient.

図1 棋譜(4.1)の進行に対する状態変数と相関係数
 Figure 1 State variables and correlation coefficient against game progress.

4.2 第60期王座戦第4局

次に解析する棋譜は、千日手という結果にもかかわらず、棋士が選ぶ2012年ベスト対局の1位になった一局である。プロ棋士をも驚愕させた銀捨ての妙手△6六銀がインパクトのある名局と評された。

図2(a), (b), (c)に示すように、中盤以降においてルートノードとリーフノードとで評価値の値やその傾向に違いが見られる。妙手△6六銀が指されたのが122手目であり、図2(d)に示す相関係数の推移に見られるように、この辺りはルートノードとリーフノードに相関関係がない非常に難解な局面と判別できる。ただし、千日手の手順が繰り返される終局近くにおいても、ルートノードの評価値は0に安定するが、リーフノードの評価値は安定せず変化速度や加速度が正や負の値を示しているのは疑問なところである。この要因として、ルートノードについてのみ、読み筋に同一局面が現れると評価値を0にするという処理を施していることが考えられる。

4.3 第2回電王戦第1局

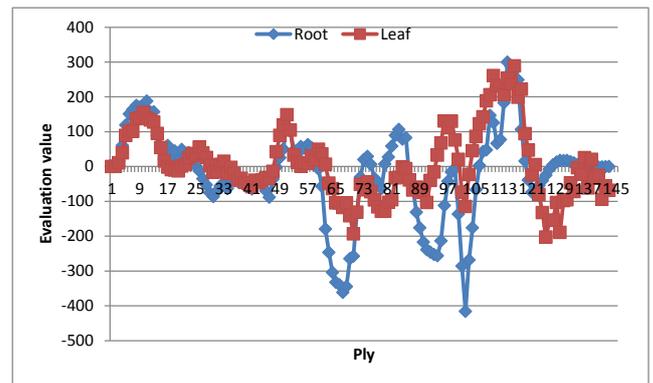
次に、プロ棋士とコンピュータソフトとの対局を解析する。本局は、コンピュータの無理攻めを誘い、攻めを切らせて完勝するという、対コンピュータ戦略が成功した一局である。第1～3回電王戦を通して唯一、コンピュータソフトの判断による投了が行われた一局であり、また中盤以降一方的な形勢になるという、プロ棋士同士の対局ではあまり見られない展開であった。

図3(a), (b), (c)に示すように、終盤の一部を除きルートノードとリーフノードの評価値および変化の傾向はほぼ一致している。なお、△6五桂と跳ねて後手が攻勢に出たのが34手目、攻めが続かなくなり自陣に手を戻したのが62手目である。変化速度で見ると、100手目以降ずっと正の値を取り続けている。図3(d)に示す相関係数で見ると、後手の攻めが切られた辺りからずっと高い値を示している。ただし、変化速度や加速度については低い相関にもなっており、誤差の影響を排除しきれていないことも考えられる。しかしながら、終盤近くでは全ての相関係数が1に近づいており、図1より明確に安定で判りやすい局面まで指し続けるコンピュータ将棋特有の推移が見られる。

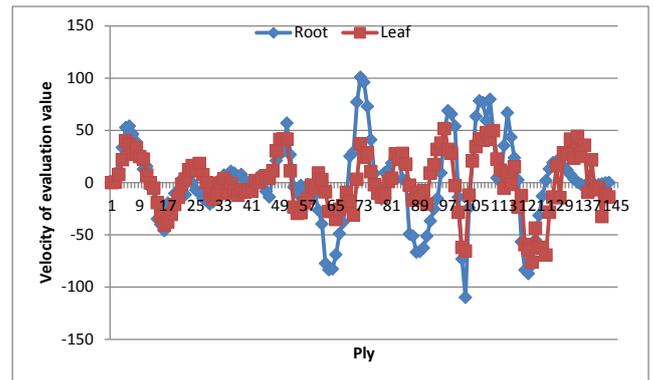
4.4 第3回電王戦第1局

引き続き、プロ棋士とコンピュータソフトとの対局を取り上げる。序盤は先手が指しやすいと言われたが、中盤以降は明確な悪手がないにもかかわらず、少しずつ後手に形勢が傾いていった一局である[7]。

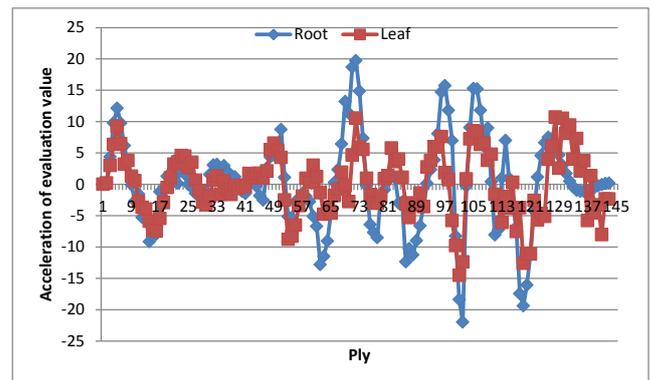
図4(a), (b), (c)に示すように、中盤以降にルートノードとリーフノードの評価値および変化の傾向に差異が見られる。図4(d)に示す相関係数で見ると、特に中盤が非常に難解な局面であったと示されている。観戦記や棋譜解説などにも取り上げられた意表の好手△4六歩が指されたのが50手目であり、プロ棋士の評価と一致している。



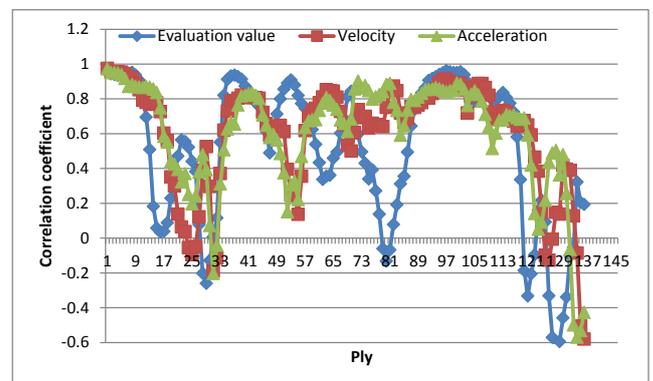
(a) Evaluation value.



(b) Velocity of evaluation value.

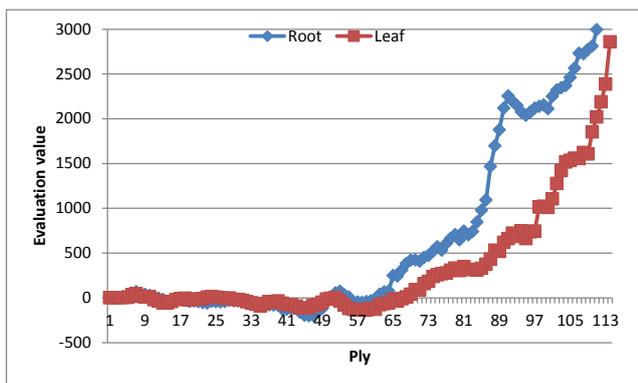


(c) Acceleration of evaluation value.

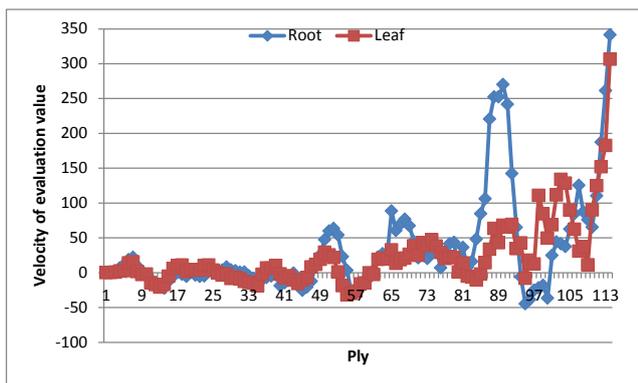


(d) Correlation coefficient.

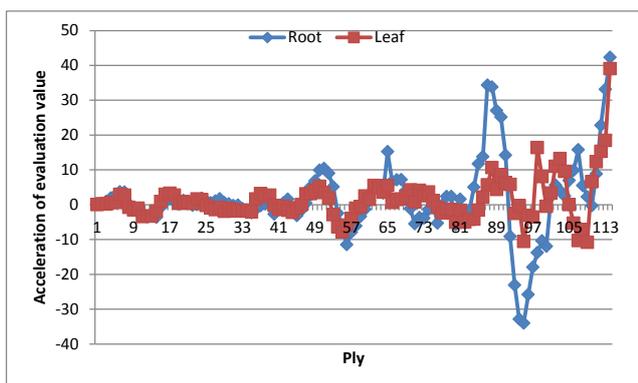
図2 棋譜(4.2)の進行に対する状態変数と相関係数
 Figure 2 State variables and correlation coefficient against game progress.



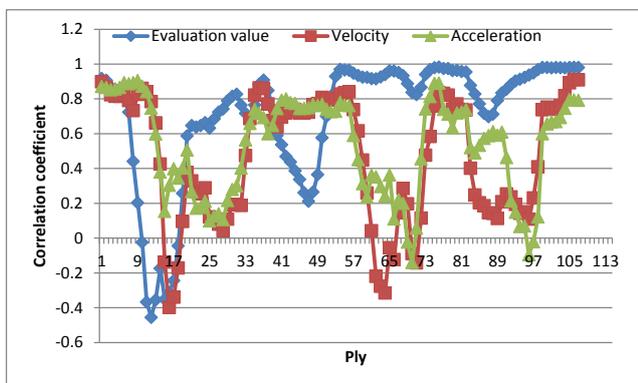
(a) Evaluation value.



(b) Velocity of evaluation value.

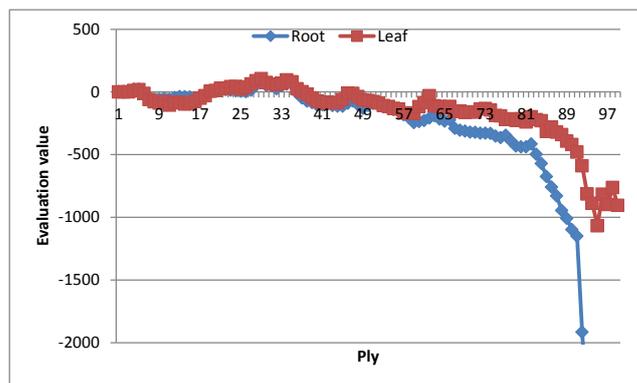


(c) Acceleration of evaluation value.

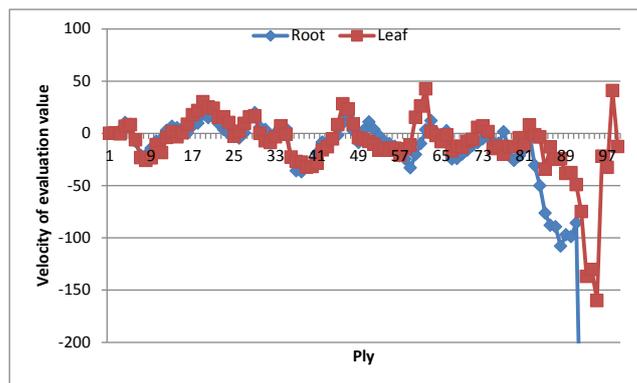


(d) Correlation coefficient.

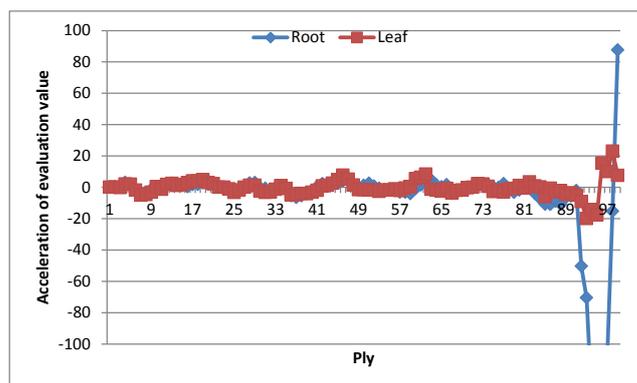
図 3 棋譜 (4.3) の進行に対する状態変数と相関係数
 Figure 3 State variables and correlation coefficient against game progress.



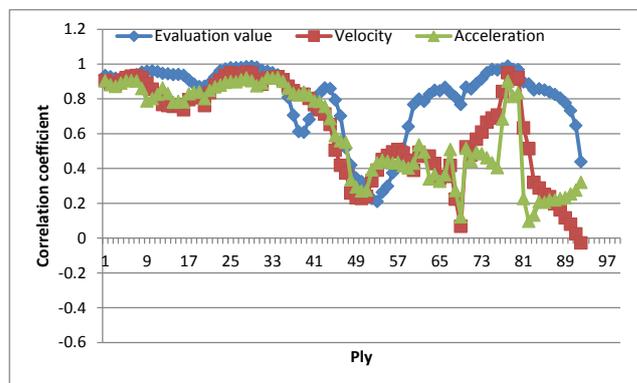
(a) Evaluation value.



(b) Velocity of evaluation value.



(c) Acceleration of evaluation value.



(d) Correlation coefficient.

図 4 棋譜 (4.4) の進行に対する状態変数と相関係数
 Figure 4 State variables and correlation coefficient against game progress.

4.5 第3回電王戦リベンジマッチ激闘 23 時間

最後は、前局のリベンジマッチとして、持ち時間を 5 時間から 8 時間に行われた一局である[8]。持ち時間が長くなったこと、コンピュータとの対局の経験を積んだことから名局が期待された。終盤まで形勢の均衡が保たれていたと思われ、期待を裏切らない熱戦になった。

図 5(a), (b), (c)に示す推移の中で、特に図 5(a)に示すルートノードとリーフノードの評価値が相反している期間が長く終盤にあることが、これまでの棋譜に見られなかった特徴である。これは、図 5(d)に示す相関係数の推移にも現れており、さらに難解な局面と推定される期間が中盤にも示されている。本局の 74 および 75 手目に、1 時間近くのコンピュータの長考に続き、3 時間を超えるプロ棋士の大長考があった。これは相関係数の推移において 2 度目に負に振れた辺りの計算に入っている。この長考中、形勢判断や最善手が何度も入れ替わったことが思考ログにも記録されており、人間とコンピュータ双方からの情報により難解な局面であったことが明らかである。

5. 名局判定に関する考察

表 1 に棋譜全体を通した相関係数を示す。変化速度や加速度については、誤差の影響を排除しきれていないこともあり、考察の対象としない。カルマンフィルタの適用などにおいて、工夫が必要と思われる。

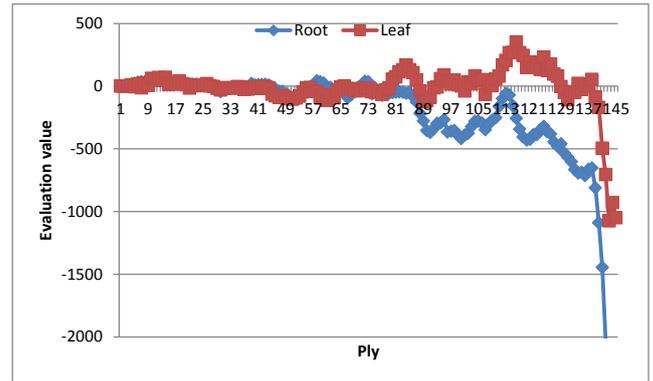
意外な早い投了で名人戦としては残念な内容となった棋譜が高い相関係数を示しているのに対し、棋士が名局と評した棋譜は低い相関係数を示している。なお、千日手処理の影響が懸念されるため、千日手手順を除いた相関係数をカッコ内に示す。相関係数が少し高くなっているが前局との差異は明確であり、難解な局面が続いていたことを推定できている。一方、プロ棋士の戦略が成功し中盤で勝負がついた棋譜よりも、勝者が第 3 回電王戦の MVP に選ばれ名局と評された棋譜や、さらに長時間に渡る熱戦となった棋譜の方が弱い相関となっているのも評判通りである。

以上、局面の難易度推定によって、プロ棋士と同様の評価ができることを示した。より多くのサンプルで統計的考察も必要であり、名局の評価には難易度以外にも様々な指標が必要だと思われるが、提案した評価指標の相関分析は芸術性評価や名局判定に有力な手法になり得るといえる。

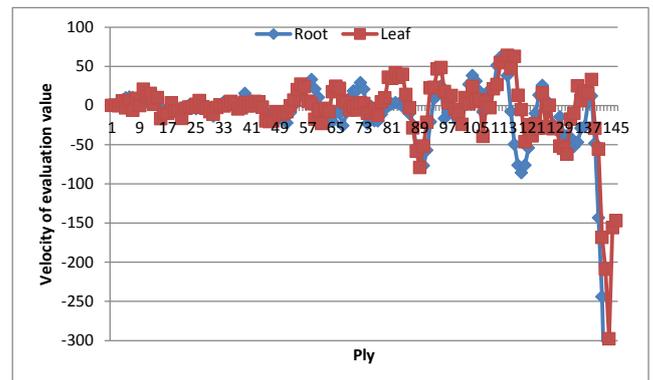
表 1 棋譜全体を通した相関係数の比較

Table 1 Comparison of the correlation coefficient throughout the game records.

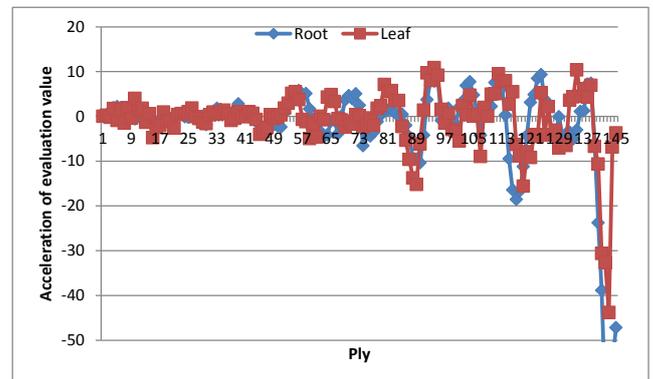
棋譜	相関係数
第 62 期名人戦第 1 局	0.923
第 60 期王座戦第 4 局	0.600 (0.679)
第 2 回電王戦第 1 局	0.956
第 3 回電王戦第 1 局	0.886
第 3 回電王戦リベンジマッチ	0.773



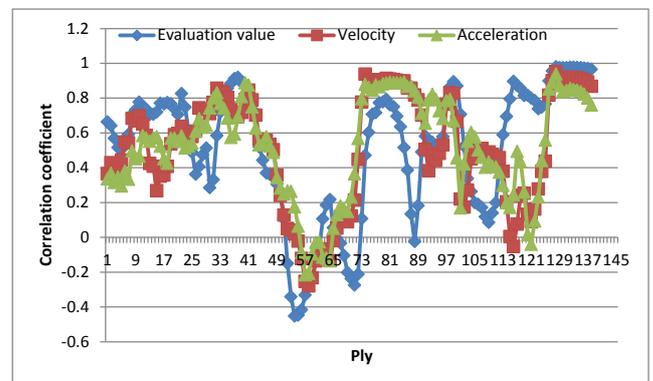
(a) Evaluation value.



(b) Velocity of evaluation value.



(c) Acceleration of evaluation value.



(d) Correlation coefficient.

図 5 棋譜 (4.5) の進行に対する状態変数と相関係数
 Figure 5 State variables and correlation coefficient against game progress.

6. おわりに

コンピュータ将棋において局面の優劣を判断するだけの評価値以上の情報を得ることを目指し、局面の難易度を推定する手法を提案した。提案手法では、リーフノードにおける評価値の正/負の比率を計測し、カルマンフィルタを用いて評価指標およびその変化速度や加速度も推定することができる。さらに、提案手法では、ルートノードとリーフノードの評価指標間の相関分析を行い、局面の難易度を推定することもできる。プロの棋譜をサンプルとして解析した結果、相関係数が局面の難易度推定や名局判定に有効な指標であり、評価指標の変化速度や加速度からも有効な情報が得られそうなことが分かった。

提案手法は、計算コストをかけずに計測できるため対局中に解析することも容易であると考えられる。劣勢なときに難易度の高い局面に誘導する指し手を選択するといった勝負手や、千日手や持将棋に戦略を切り替える判定などにも活用できる可能性がある。

参考文献

- 1) McAllester, D.A.: Conspiracy Numbers for Min-Max Search, *Artificial Intelligence* Vol.35, No.3, pp.287-310 (1988).
- 2) Allis, L.V., van der Meulen, M., Van Den Herik, H.J.: Proof-number search. *Artificial Intelligence* Vol.66, No.1 pp.91-124 (1994).
- 3) 長井歩, 今井浩: df-pn アルゴリズムの詰将棋を解くプログラムへの応用, *情報処理学会論文誌*, Vol.43, No.6, pp.1769-1777 (2002).
- 4) 石飛太一, 飯田弘之: 詰将棋問題の感性評価と証明数に関する考察, 第17回ゲームプログラミングワークショップ2012, pp.163-166 (2012).
- 5) 竹内章, 飯田弘之: 将棋における投了局面の識別, *情報処理学会論文誌*, Vol.55, No.11, pp.2370-2376 (2014).
- 6) 竹内章: コンピュータ将棋における大局観の実現を目指して, *人工知能学会誌* Vol.27, No.4, pp.443-448 (2012).
- 7) 竹内章: 非線形評価関数の改良により臨んだ第3回将棋電王戦, *情報処理*, Vol.55, No.8, pp.847-850 (2014).
- 8) 竹内章: 長時間の対局から考察するコンピュータ将棋-電王戦リベンジマッチ激闘23時間を振り返って-, *知能と情報*, Vol.26, No.5, pp.192-199 (2014).