図形の空間的な位置関係に基づく描画の予測機構

Predictive Drawing based on Spatial Relationships among Segments

五十嵐 健夫　　松岡 聡　　田中 英彦*

Summary. Thispaper describes a predictive drawing mechanism that enables the rapid construction of precise diagrams. A predictive drawing system automatically predicts the user's next drawing based on the existing spatial configuration of line segments, and the user can select one of the predicted segments by clicking. The user can draw various diagrams by successive clicking alone as long as the system correctly predict the intended drawings. The prototype system is implemented on an interactive beautification system, and the prediction mechanism works successfully as an effective and unintrusive assistance.

1　はじめに

計算機上での描画システムの高機能化、高性能化が進んでいるが、多くは描画効果の充実など完成品としての絵の完成度を高める方向であり、描画作業そのものの労力低減に関しては多くの課題が残されている。このような認識にたち、我々は計算機に図形の構成を認識・理解させることによって描画作業の負荷を低減させるシステムを提案・実装を試みている [8] が、本稿では新たに図形描画における予測機構の導入について提案する。

基本的なアイデアは、画面上に似た形の図形があればその周りにも同じような図形を描くはずである、というもので、時系列的な操作履歴に基づく従来の予測機構とは異なり画面上に存在する図形間の空間的な位置関係に基づく予測機構となっている。本予測機構は対話的整形システムの上に実装されており、図形描画の手間の削減に有効に働くことを確認している。

以下、本予測機構を実装した基盤システムである対話的整形システムについて簡単に紹介した後、本予測手法を用いた描画方法について説明する。ついで予測アルゴリズムとして図形の空間的な位置関係に基づく予測方式を説明し、考察を加える。最後に、予測インタフェースに関する関連研究について簡単に述べ、まとめを述べる。

2　対話的整形システム

対話的整形システム [2] はユーザの描いたフリーストロークから様々な幾何学的制約を自動的に抽出して整形を行うシステムである。さらに、曖昧性の問題を解消するために

* Takeo Igarashi, 東京大学大学院 工学系研究科 情報工学専攻, Satoshi Matsuoka, 東京工業大学大学院　情報理工学研究科　数理・計算科学専攻, Hidehiko Tanaka, 東京大学大学院 工学系研究科 情報工学専攻

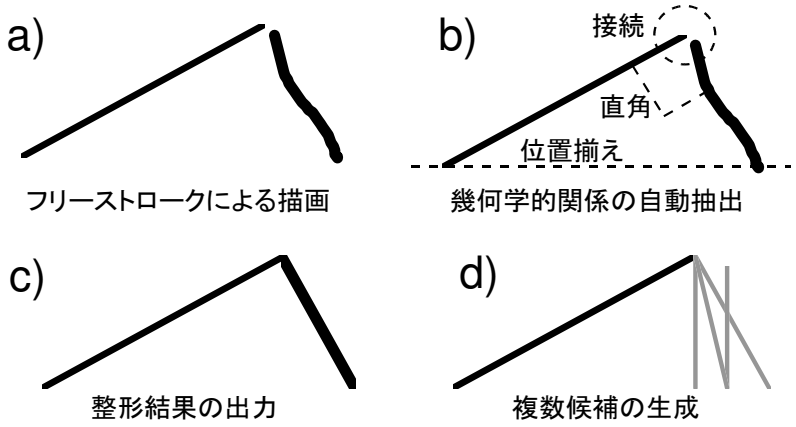

図 **1.** 対話的整形 (Interactive Beautification)

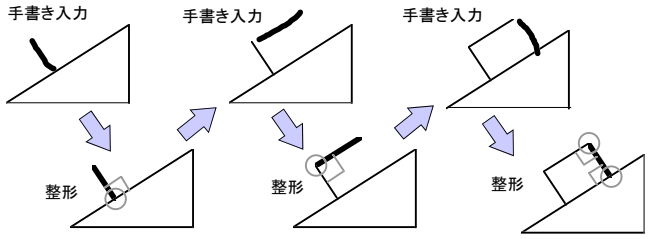

図 **2.** 対話的整形による描画例

複数の候補が同時に生成され、ユーザは希望するものを直接クリックして選択することができる。

図 1 に対話的整形による描画の例をしめす。まず、ユーザはフリーストロークにより意図する線分の概形を描く (図 1a)。システムは周囲の図形の位置関係からこのフリーストロークの満たすべき幾何学的制約を推測する (図 1b)。最後に推測された幾何学的制約を連立方程式として解くことにより整形結果としての図形を生成し提示する (図 1c)。その際、矛盾する幾何学的制約を排他的に処理することにより複数の候補を生成し画面上に表示、ユーザに選択させる (図 1d)。

対話的整形システムを利用することにより、複製や反転・回転といった複雑な編集操作を行なうことなく、フリーハンドによる描画と画面上の候補の選択という自然な操作を繰り返すことで、複雑な幾何学的制約を満たした図形を正確に描くことが可能になる (図 2)。

本稿で提案する予測機構は、この対話的整形システムの拡張として実装されたものであり、整形の結果として新しい線分が確定したときに起動される。後でも述べるように、予測結果が気に入らない場合には直接次のフリーストロークを描画することができるので、予測機能をまったく意識することなく描画を進めることも可能である。

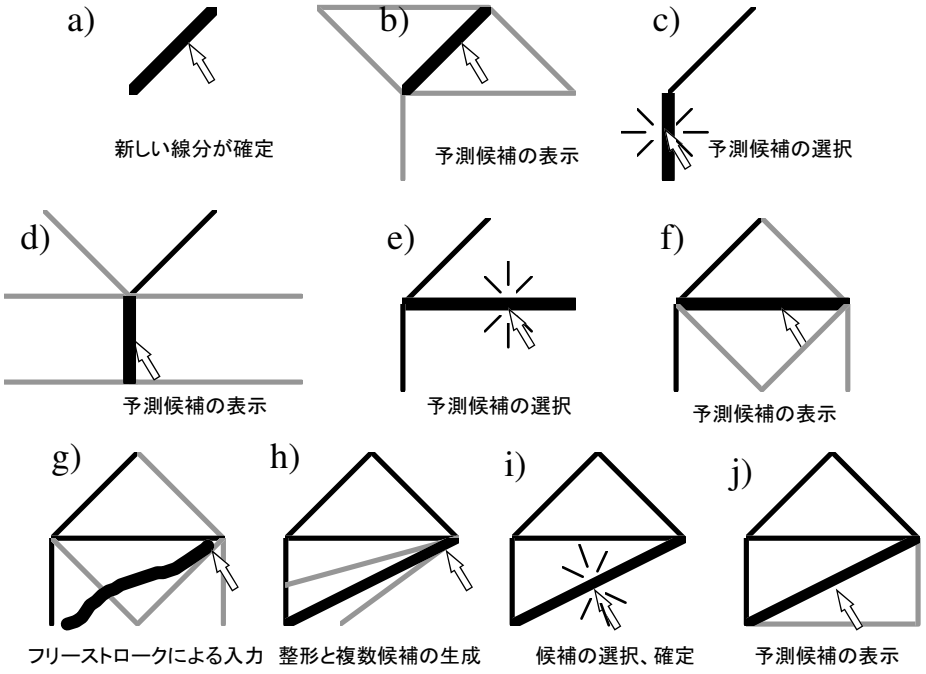

図 3. 予測描画を利用した描画作業の例

3 予測機構を利用した描画操作

本章では、予測機構を利用した描画がどのように行なわれるかを説明する。ここでは、ユーザから見た場合に描画がどのような手順で進むかに注目して説明を行ない、予測アルゴリズムの内容については次節で詳しく説明する。システムによる描画予測は各描画作業終了毎に行なわれ、予測描画候補が画面上に表示される。以下、具体例を用いて説明する[1]。ここで、太線が最後にシーンに追加された線分を、灰色の線分が予測機構によって生成された描画候補を表す (ただし、h 中の灰色線分だけは対話的整形処理によって生成された複数の整形候補である)。

1. 対話的整形あるいは予測描画によって新しい線分が確定する (図 2a)。
2. 最後に確定した線分 (Trigger segment) の周囲に予測機構によって生成された次の描画候補 (Predicted segment) が表示される (図 2b)。
3. 気に入った候補があればそれをクリックすることで選択し確定する (図 2c)。
4. 確定した線分が新たな Trigger segment となり、その周囲に次の予測候補が表示される (図 2d)。
5. 3,4 を繰り返すことで描画が進む (図 2e-f)。

[1] 本文中に使用されている図中の予測候補は、説明を容易にするために本来あるべきものが省略されていることがあり、必ずしも実装されているアルゴリズムに忠実であるとは限らない。

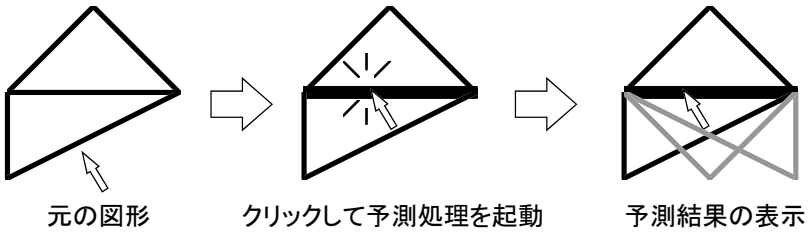

図 4. 画面上の線分をクリックすることによる予測処理の起動

6. 予測候補の中に気に入ったものがない場合には、希望する図形の概形をフリーストロークで描くことにより対話的整形処理へ移行する (図 2g-i)。

7. 確定した時点で再び予測機構が働き次の描画候補が表示される。(図 2j)。

この予測描画手法の最大の特徴は、「予測が成功しつづけている限り、次々と現れる予測線分をクリックしていくだけで様々な図形を描くことができる」点である。対話的整形との関係でみた場合には、特別な予測起動操作を必要とせず予測候補が常に自動的に生成・表示される点、および予測が失敗した場合に特別な予測取消操作を行なうことなく対話的整形処理へ自然に移行できる点が重要である。このような暗黙的な予測起動・取消処理によって、本予測機構は対話的整形システムに対する自然で効率のよい拡張となっている。

さらに、最後に確定した線分を Trigger segment とするだけでなく、任意の既存の線分をクリックすることでその線分を Trigger segment としてその周囲に予測候補を生成することもできる (図 4)。この機能により、自由な順序でより柔軟に描画を進めていくことが可能になる。

4 図形の空間的位置関係に基づいた予測アルゴリズム

ここでは、現在実装されている図形の空間的位置関係に基づいた予測アルゴリズムについて説明する。ただし、前述の予測に基づく描画方式とそこで使用される予測アルゴリズムは基本的に独立であり、本アルゴリズム以外にも様々なものが利用可能である。

現在実装されている予測アルゴリズムは, 図形の複製, 描画の繰り返し, 左右上下の反転 (線対称図形の描画), 180 度回転 (点対称図形の描画),90 度回転をサポートしており, それらすべてが同時に予測されるが、ここでは個々の処理について順番に説明していく。

4.1 図形の複製の予測

基本的な考え方は、「新しく確定した線分と同じものが画面上にすでに存在していたならば、新しく描いた線分の周囲にもその対応する線分の周囲にある図形とおなじような図形を描くだろう」というものである。以下、図 5 を例にとって具体的な予測アルゴリズムの働作を説明する。ここで左側の図 (a-f) は予め描かれていたものとする。

1. 新しい線分 g が確定し予測が起動されると、システムはまず Trigger となる線分 (g) と同一形状 (長さと傾きが等しい) である線分 (a) を画面上から捜し出す。

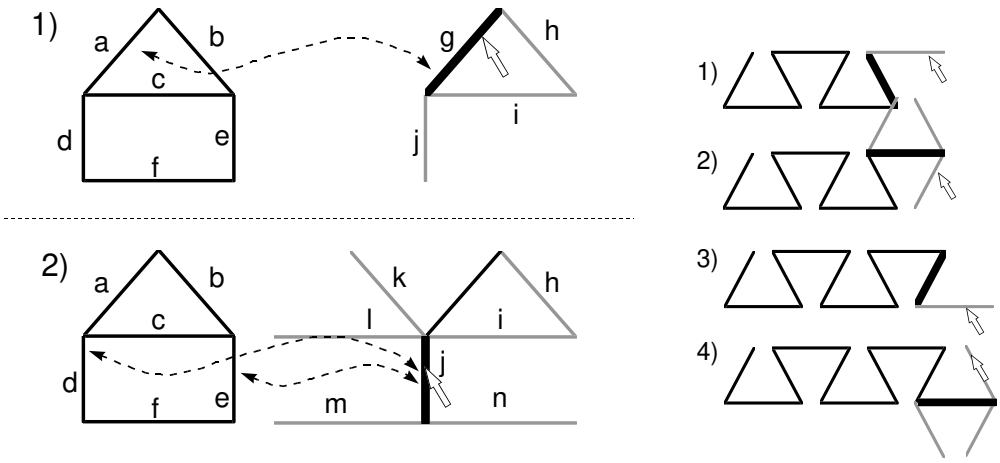

図 5. 図形の複製予測アルゴリズム (右: 反復操作の予測)

2. a と g が同一形状であるとわかったので、システムは g の周囲にも a の周囲にある (より具体的には b の端点に直接接している) 線分 b, c, d と同じような図形を描くであろうと予測し、予測候補 h, i, j を生成する。

3. ユーザが j を選択すると今度は j が d および e と同一であるので、d の周囲の線分 a, c, f および e の周囲の線分 b, c, f をコピーしてくることにより 予測候補 i, k および l, m, n が生成される。

以降、これを繰り返すことにより図形全体の複製が実現される。複製は一部分づつ対話的に行なわれていくので、全体を忠実に複製するだけでなく一部分だけ異なる図形を描くことも自然に行なえる。複製操作を細かく繰り返すことで図 4 右のような図形の描画も可能である。

まとめると、図形の複製操作の予測は以下のように記述されるアルゴリズムによって実現される。

1. 最後に描かれた線分 (Trigger segment) と同一形状 (長さおよび傾きが一致する) である線分 (Reference segment) を画面上をサーチして集める。

2. Reference segment と直接接している線分 (Context segment) を集めその間の関係を記録する。

3. Reference segment と Context segment の間の位置関係 (接続関係) が、Trigger segment と 描画予測の結果である Predicted segment の間の位置関係と対応するように、Predicted segment を生成して表示する。

4.2 描画予測アルゴリズムの拡張

Reference segment として、 Trigger segment と同一形状である線分に加えて以下にのべる様々な線分を扱うことにより、対称図形や回転図形の描画予測などが可能となる。

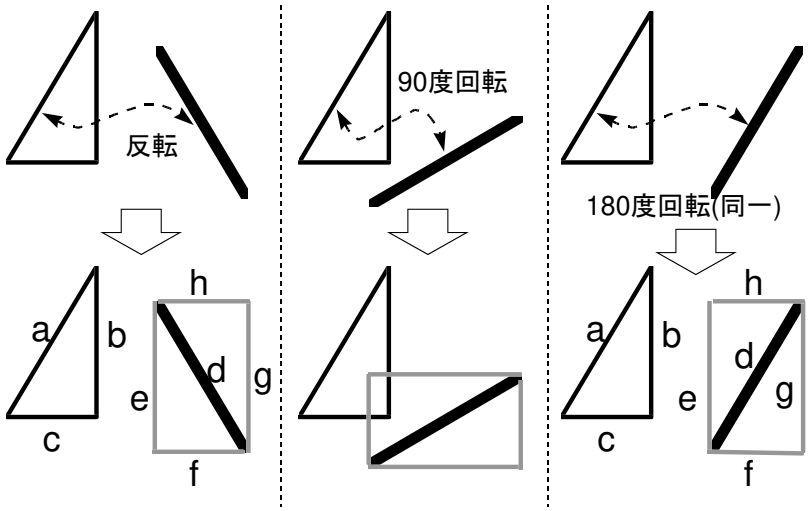

図 **6.** 対称図形および 90,180 度回転図形の描画予測

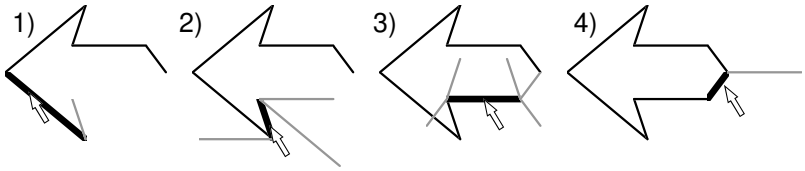

図 **7.** 予測機構を利用した対称図形の描画

対称図形の描画予測は、Reference segment として Trigger segment を上下左右に反転したものを加えることで実現される。例を図 6左にしめす。線分 d が 描かれた時点で、a が d の左右反転であることから a に接している b,c をもとに 予測候補 e,f が、a が d の上下反転であることから a に接している b,c をもとに 予測候補 g,h が生成される。このような処理を繰り返すことで図 7のような対称図形の描画が実現される。

同様にして, Reference segment として Trigger segment を 90 度回転したものを加えることで、90 度回転図形の描画予測が実現される (図 6中央)。

180 度回転図形 (点対称図形) の描画予測は、Reference segment として Trigger segment を 180 度回転したものを加えることで実現される。図 6右に例を示す。線分 d が描かれた時, a が d と同一であると同時に 180 度回転したものでもあるため、f,g に加えてそれらを 180 度回転した e,h を同時に生成する。

さらに、この 180 度回転を取り扱う機構と、自分自身 (Trigger segment) を Reference segment とする自己参照機構を組み合わせることで図 8のような予測も可能となる。ここで、b が描かれた時点で、b は b 自身を 180 度回転したものと同一であるため、a を 180 度回転した c が予測候補として生成されている。

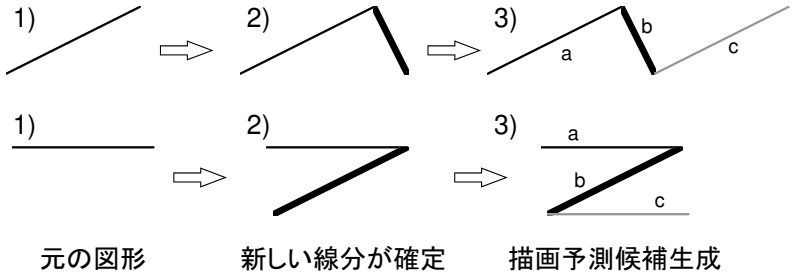

図 8. 180 度回転と自己参照を利用した描画予測

4.3 複数の予測機構の同時動作

実際のインタラクションにおいては、以上のような予測アルゴリズムが同時に働くことにより多くの予測候補が同時に生成され表示される。図 9に現在の実装において生成される候補集合の例とそれぞれの予測の生成根拠を示す。なお、様々な方法による予測の結果として形状および位置が共に一致する候補が複数生成された場合には、一つを残して残りは破棄される。また、生成された候補と同一の線分がすでに画面上に存在していた場合にも、その候補は破棄される。

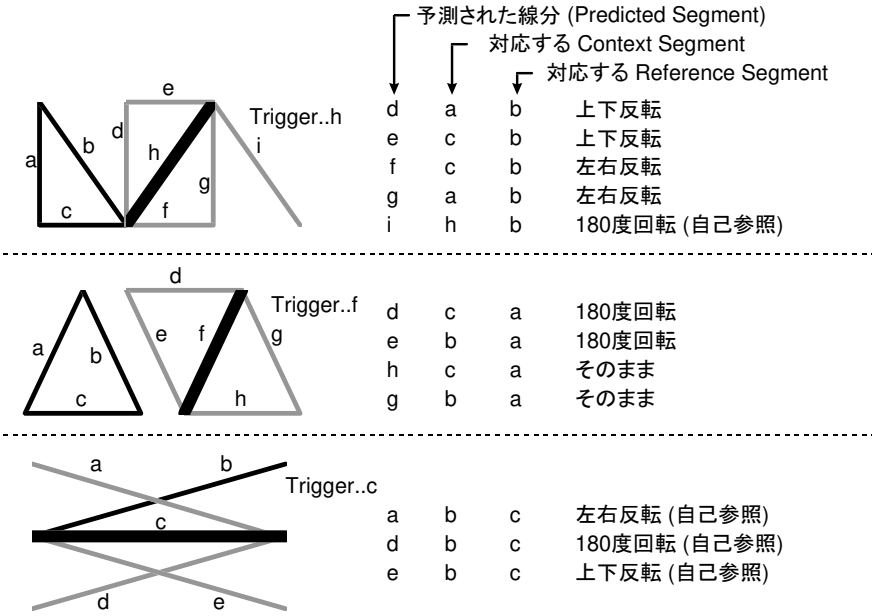

図 9. 描画予測の例: 予測候補とその生成根拠

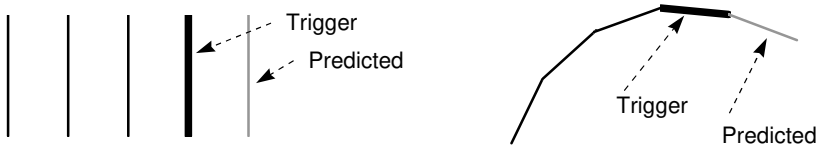

図 **10.** 現在は実現されていないが将来有効と考えられる予測の例: 等間隔と等角度

5 議論

本手法は、通常の描画エディタや CAD システム において使用することも可能であるが、以下の理由から対話的整形システムに特に適した手法といえる。

- 新しい線分が画面上のどの線分と対応するかが対話的整形処理の過程で明らかになっている。
- 対話的整形における複数候補選択インタフェースと、予測描画における予測候補選択インタフェースが共通 (候補が画面上に同時に表示され、直接クリックすることで選択が行なわれる) である。
- クリックは候補の選択 (確定) で、スイープは線分の入力である、というように ユーザ入力の意味が明確であり、予測の起動および取消を行なうために特別なコマンドを起動する必要がない。

現在実装されている予測アルゴリズムの限界として、直接接していない線分間の関係を利用できないという問題、および 任意角度での回転をサポートしていない点が挙げられる。このような関係を利用することにより、図 10のような描画予測が可能となると期待される。また拡大縮小処理を加えることで相似図形の描画も可能になる。

しかし、予測の種類を増やすとそれだけ予測結果として生成される候補の数が増えるわけであり、画面上に表示される候補の数が増え過ぎて候補選択が困難になる危険がある。現在の予測機構のままであっても、図形が複雑になってきた場合には予測候補数の爆発が避けられないため、本予測機構の実用化のためにはなんらかの方法で予測候補の生成を制限する機構を組み込む必要がある。生成予測候補数を制限する方法として、現在以下のような手法を検討している。

- 時間的および空間的近接性を利用する。すなわち、最近描いた線分や近くの線分のみを予測の根拠として利用する。
- ユーザに予測の根拠として使用する線分 (Reference および Context segment) を直接指定させる。
- 予測を行なう際に、個々の線分間の対応を見るだけでなく、幾つかの線分をまとめてそれらの位置関係を考慮する。
- 学習機能を付与する。すなわち、ユーザの候補選択履歴からユーザのよく利用する予測条件とそうでないものを学習し、不要な候補を生成しないようにする。

これらの候補数絞りこみ手法は、そのまま対話的整形の整形候補数の削減にも利用することができる。特に、参照する線分を直接指定させる方法は対話的整形と予測機構で共通のインタフェースを利用できると期待されるので非常に有効と考えられる。

6 関連研究

ユーザインタフェースにおける予測機構、あるいは Programming By Example(PBE) による作業の省力化・自動化の研究は数多く行なわれている [6][1][5][10]。これらは、システムがユーザの操作履歴から規則性を抽出し、その情報に基づいて次の操作を予測あるいは、一連の作業の自動化を行ない、ユーザの作業手数を減らそうというものである。このような操作履歴からの予測インタフェースでは規則性の抽出の際に適切な汎化を行ない、またインタフェースを工夫してユーザの操作を防げないようにすることである程度の効果が得られている。

本稿で提案した手法は、これらの予測機構を図形描画に応用したもので、操作コマンドの時系列上の規則性のかわりに図形の空間的な規則性を利用する。ユーザの目に見えない操作コマンド列を扱うのでなく、画面上に存在するオブジェクトの位置関係のみを予測の根拠とすることでより直感的で理解しやすい予測動作となるほか、描画順序によらないより一般的な予測が可能となる。また、予測機構に不可避な問題として予測誤りの問題があるが、本手法は予測を複数生成してユーザに直接選ばせるようにすることで予測誤りの弊害を最小限に抑えている。

図形のもつ空間的な位置関係を利用したシステムとして [4][9] などがある。これらは、予め指定した一定の空間的位置関係を満たすオブジェクト群を画面上から探し出し、予め指定した変換を行うというものであり我々の予測機構とも関連が深いが、本システムは特別なルールを用いることなく画面上のオブジェクトの位置関係のみを利用する点や既存図形の変換でなく描画の予測を行なう点で異なっている。

7 まとめ

描画システムにおける予測機構として、従来の時間的な操作の規則性に基づく推測にかわる、図形のもつ空間的な規則性に基づく予測機構を提案した。この方法は、目に見えない操作履歴を利用するのでなく、常に目に見えている知覚的な性質 [3][7] を利用しているという点でより直感的で理解しやすいインタラクションといえる。

さらに、実際にこの予測機構を対話的整形システムの上に実装し, 描画の繰り返しや図形の複製や反転・回転操作の省力化に有効に働くことを確認した。特に、予測がうまく働いている限りにおいては、希望する線分を画面上で順にクリックしていくだけでさまざまな図形を描くことができるようになっており、描画の手間の大幅な削減を実現している。予測機構においては一般的に予測の失敗あるいは不要な予測動作への対処が問題となるが、予測結果を選択可能な複数候補として提示し、対話的整形処理への自然な移行インタフェースを提供することでこの問題を解決している。

今後は、色や線幅等の他の図形的性質の予測を取り込んでいくとともに、予測機構を拡張することにより拡大縮小や回転などの機能を実現していく予定である。また、今回紹介した予測アルゴリズムは描画順序によらない空間的な規則性に基づくものであったが、操作履歴における規則性(繰り返し)を利用した予測との組み合わせも可能であると考えられ、この方向での拡張も検討している。

謝辞

本研究を行なうにあたり有益なアドバイスを下さったソニー CSL の増井俊之氏、ならびに TRIP グループおよび 東京大学工学部 田中英彦研究室の皆様に感謝致します.

参考文献

[1] Cypher,A. "EAGER: Programming repetitive tasks by example." *Proc.of CHI'91*, pp. 33-39, 1991.

[2] Igarashi,T., Matsuoka,S., Kawachiya,S., Tanaka,H., "Interactive Beautification: A Technique for Rapid Geometric Design", *Proc. of UIST'97*, 1997, (in press).

[3] Igarashi,T., Matsuoka,S., Masui,T., "Adaptive Recognition of Human-Organized Implicit Structures", *Proc. of Visual Languages '95*, pp. 258-266, 1995.

[4] Kurlander,D. Feiner,S., "Interactive Constraint-Based Search and Replace", *proc.of CHI'92*, pp.606-618, 1992.

[5] Masui,T. and Nakayama,K., "Repeat and predict - two keys to efficient text editing", *Proc. of CHI'94*, pp. 118-123, 1994.

[6] Maulsby,D.L., Witten,I.H, Kittlitz,K.A., "Metamouse: Specifying Graphical Procedures by Example", *Computer Graphics*, Vol.23, No.3, pp.127-136, 1989.

[7] Saund,E., Moran,T.P, "A Perceptually Supported Sketch Editor", *Proc.of UIST'94*, pp. 175-184, 1994.

[8] 河内谷 幸子, 五十嵐 健夫, 松岡 聡, 田中 英彦, "認知的負荷を軽減する描画方式の提案と実装", インタラクティブシステムとソフトウェア IV(WISS'96), pp.71-80, 1996.

[9] 原田 泰徳, 宮本 健司, "Visual Dispatch: Visibility に基づくアプリケーション構築法", インタラクティブシステムとソフトウェア IV(WISS'96), pp.61-70, 1996.

[10] 宮本 健司, 原田 泰徳, "PDraw: 図形書き換え規則にもとづく予測機能つき描画エディタ", インタラクティブシステムとソフトウェア IV(WISS'96), pp. 91-100, 1996.