

幾何学的制約を考慮した図形編集手法

本多 正明 †五十嵐 健夫 田中 英彦 坂井 修一
東京大学 電子工学専攻
†東京大学 情報工学専攻

既存の描画システムでは、接続、合同などの制約を満たす幾何学的図形を描画するために回転、拡大といった複雑な編集操作を組み合わせる必要があった。本稿ではこのような図形編集操作を手早く行うことのできる2つの手法を提案する。1つは、動かしたい図形中の一線分と、その線分が移動すべき位置にある線分を対応づけることにより、図形を目的の位置に複製する手法である。もう1つは、図形の移動回転拡大縮小を行う直接操作において、自動的に図形的制約を満たすような位置に図形をスナップさせるものである。プロトタイプを用いた分析の結果、これらの2手法により既存の描画システムに比べ少ない操作数での図形編集が可能になることが示された。

Diagram editing techniques with considering geometric constraints

Masaaki Honda, †Takeo Igarashi, Hidehiko Tanaka, Shuichi Sakai
Dept. of Electronic Engineering, Univ. of Tokyo,
†Dept. of Information Engineering, Univ. of Tokyo

It takes a considerable number of operations to achieve precise manipulation of a diagram in conventional drawing editors or CAD systems. In this paper, we propose two interaction techniques to solve the problem. One is a duplication technique where the user specifies a line segment of the diagram to be duplicated and the corresponding target line segment. The other is a dynamic manipulation technique which allows the user to move, rotate, and scale a diagram while satisfying possible geometric constraints. Our preliminary analysis showed that our techniques can reduce the number of necessary operations.

1 はじめに

本研究の目的は、図1のように相似な形状を含む幾何学的な図形を正確に描画するとき、図形編集に不慣れた初心者でも、訓練することなく直感的に使える手法を提案することである。

具体的には、以下のような二つの図形編集手法を

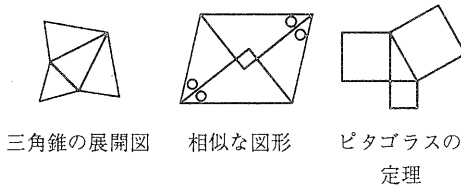


図1: 描画サンプル

提案する。

一つは移動する図形の線分と、移動先の線分を指示して与え、二線分の対応から図形を移動・複製する方法である。

もう一つは直接操作によって図形を編集する方法で、図形を移動、回転、拡大縮小する際、編集図形の頂点が画面上の点に一致するような点にスナップされるというものである。

また、本論文で提案した二手法を実装し、評価検証を行う。

2 従来手法

まず、既存の幾何学的図形の描画手法の例として、市販のCADシステム (Ashlar 社 Velleum 3D™ [3]) による操作例を説明する。

図2に Vellum を使用した場合の図形の編集操作の様子を示す。操作手順は次のようになる。

1、図形選択

- (1a) メニューから図形選択ツールを選ぶ
- (1b) ドラッグ&ドロップで変形する図形を選択する

2、移動操作

- (2a) メニューから移動ツールを選ぶ
- (2b) 移動元図形の頂点をつまむ
- (2c) ドラッグで移動し、移動先図形の頂点に移動する

3、回転操作

- (3a) メニューから回転ツールを選ぶ
- (3b) 図形の回転中心を選ぶ
- (3c) 図形の頂点をつまむ
- (3d) ドラッグして回転し、辺の角度が一致するような回転させる

4、拡大縮小操作

- (4a) メニューから拡大縮小ツールを選ぶ
- (4b) 図形の拡大中心を選ぶ

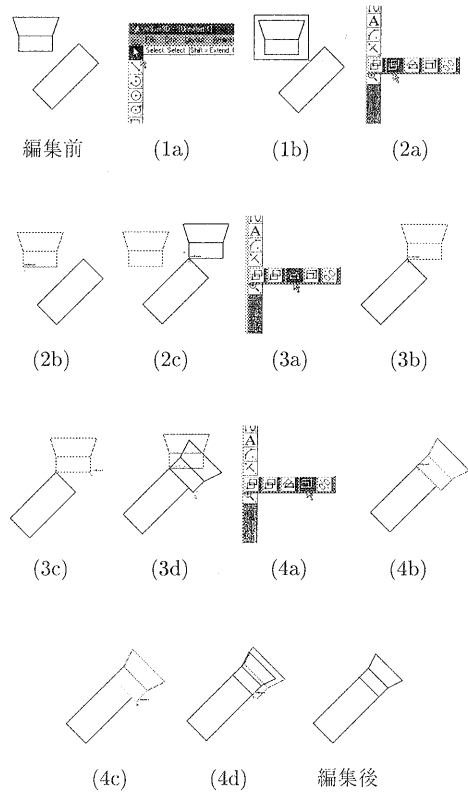


図2: Vellum による図形の編集方法

(4c) 図形の頂点をつまむ

(4d) ドラッグして縮小し、端点が一一致するよう縮小する

Vellum ではメニューから移動や回転などのコマンドを選択してから図形を編集するため、ユーザはメニューと図形を交互に見なければならぬ。また、全体の操作数も多く、図形編集時も頂点などを細かく指定する必要があるため、編集作業が多くなるとユーザへの負担が多くなる。特に、移動、回転、拡大縮小を組み合わせた操作を行うときは、コマンドの切り替えなどの手間がかかってしまう。

なお、図形編集に関する研究例として対話的整形による幾何学図形の描画機構 Pegasus [1] や VisibleDispatch[2]がある。Pegasus はユーザのフリーストロークと画面上にある線分がどのような幾何学的制約を満たしているか調べて整形を行うシステムである。VisibleDispatch は図形の置き換えルールを定めておき、画面上の図形の置換を行うシステムである。

3 制約を考慮した図形編集手法

ここでは前章のような従来手法の問題点を解消する二つの手法を提案する。

3.1 対応する線分の指示による方法

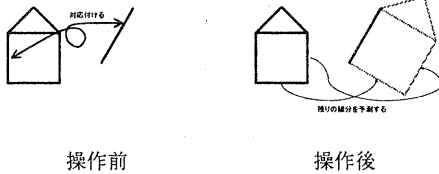


図 3: 対応する線分の指示による方法

対応する線分の指示による方法の基本的アイデアを図 3 に示す。複製元の図形の本一の線分と複製先の対応する線分を指示することにより、複製元のその他の線分を拡大縮小、回転して複製するというものである。図形複製時に必要となる幾何学的な情報は、複製元の線分と複製先の線分の長さの比、なす角度、位置のずれから自動的に計算されユーザの入力を省くことができる。

図 4 にユーザの指示による図形予測の例を示す。まず、図 4 編集前のように棒と台形状の図があるとする。始めに、複製先になる線分をクリックして選択し、次に複製元の図形の対応する線分をクリックして選択する。するとウインドウの下に予測候補が表示される。意図する図形の形を選ぶと図形が描画される。

線分と線分との対応から予測される図形は四つである。線分に関する 180 度回転と鏡対称の図形、及び 180 度回転したものの鏡対称の図形である。この例の場合左右対称なので候補は 2 つになる。

この手法は、三回のクリックで編集が可能のため初心者にも簡単に操作が出来る。しかし、応用範囲が狭いという問題もある。

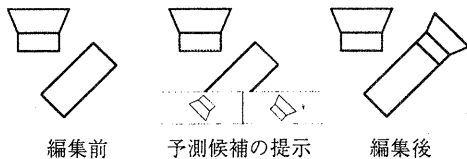


図 4: 対応する線分の指示による方法

3.2 直接操作による方法

直接操作による方法では、図形の移動、拡大縮小、回転をモードの切り替え無しに行い、図形編集中に画面上から図形の制約を抽出して整形を行うというもの

である。

従来の描画システムでは図形を操作するとき、図形を選択した後または選択する前に、移動、拡大縮小または回転というモードに設定してから図形を編集した。しかし、モードの切り替えなどの負担を減らす為、本システムでは、

1. 図形の中心部をつかんでドラッグすると移動
2. 周辺部をつかんで重心方向に動かすと拡大縮小
3. 周辺部をつかんで重心方向と直角方向に動かすと回転

という方法を採用している。また、拡大縮小、回転の中心は従来の描画システムでは手で設定していたが、本手法では編集図形と画面上の図形に接点がある場合、自動的にその点にスナップされる。

図 5 に操作方法を示す。

1. 移動の対象となる図形を選択する。
2. 図形の中心付近をドラッグして移動する。
3. 図形を移動して棒に接する位置に移動する。
すると、システムは点の接したところが拡大縮小、回転の中心点になることを予想し、中心点を移動する。
4. 次に対象図形の周辺をつかんで拡大縮小、回転を開始する。
5. マウスを動かし、棒の辺と台形状の図形の辺が一致するように動かす。
6. 右クリックをすると図形が確定する。

各操作においてスナップ機能が働き、幾何学的制約を満たした図形が得られる。

本システムでは拡大縮小、回転操作を 1 つのコマンドで行っているが、図形を回転させず拡大縮小のみしたい、あるいはその逆の要求を満たすため、図形編集中に、元の図形の 1~4 の定数倍、1~4 の定数分の 1 の大きさにスナップする。また、回転については 30 度、45 度の定数倍の角度にスナップする。

この手法の特徴は、移動、回転、拡大縮小がモードの切り替えなしに行えることである。また、中心点が自動的に移動するため手間が省ける。

4 評価

Java™ で実装されたプロトタイプシステムと市販の CAD ソフトウェア (Ashlar 社 Vellum 3D™、以下 Vellum) を使用して操作量の分析を行った。

評価実験では、静的な分析と、被験者を使った描画実験の二つを行う。静的な分析では理想的な操作を行ったときのマウスのクリック・ドラッグ数を分析することにより熟練したユーザが編集を行った際にかかる操作の時間がどうなるかを明らかにする。被験者を

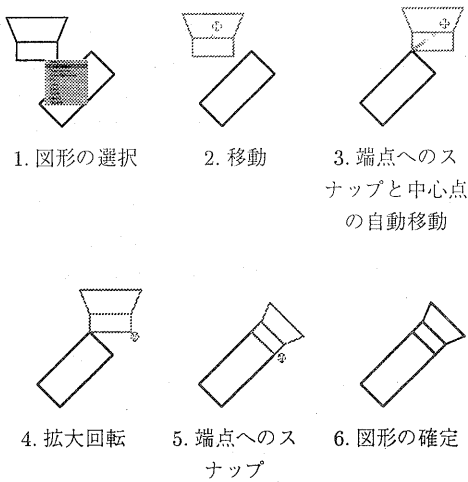


図 5: 直接操作による方法

使った描画実験では、チュートリアルと課題図形の編集を行うことによって各手法のインターフェースのわかりやすさ、問題点を明らかにする。

4.1 静的な操作数の分析

4.1.1 実験条件

実験では図 6 左側にある編集前の図形が既に与えられているものとする。編集前の、左にある部品を移動、変形して、右にある柱の上にくっつけていく作業を行い、最終的に編集後の図形を完成させるという操作を行った。

本論文で提案した二手法と Vellum を使い、編集前の状態から編集後の状態にするまでにどれくらいマウス操作が必要であるかを分析した。分析したのは目的の図形を得るまでに必要な、最小限のクリック、ドラッグの回数である。

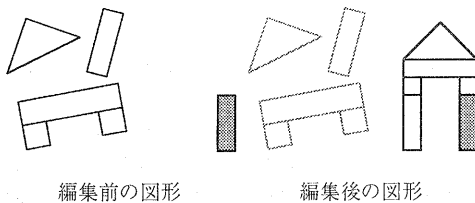


図 6: 評価用図形

4.1.2 結果

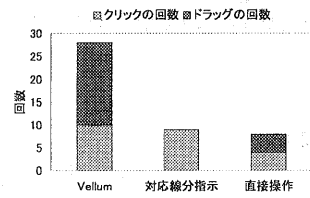


図 7: 静的評価

図 7 に結果を示す。

最小限の操作で図形を編集した場合、マウス操作の総計では本二手法ともに Vellum に比べて大幅に操作数が少ない。直接操作による方法では図形の二つの端点が画面上の点に十分近く、回転拡大操作を必要とせずに目的の編集ができた場合もあった。静的評価の結果から、我々の提案する手法により幾何学的制約に基づく図形の編集作業が削減されることが示された。

本分析では、理想的な場合の操作数をみた。実際には、操作の途中で間違いが生じる。その度合いをみるため、次節で述べる被験者による描画実験を行った。

4.2 被験者による描画実験

4.2.1 実験条件

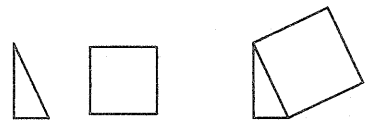


図 8: チュートリアル用図形

図 8 の図形を使って各々のツールのチュートリアルを行った。

編集前の図形が既に描かれているものとして、編集後の図形の状態にする最低限の操作方法を学習してもらった。また、編集操作を誤ったときのために Undo を教えた。

学習は、まず編集操作を教えながら実際に編集を行うところを見てもらい、その後、実際に被験者に同じ操作をしてもらった。途中、分からないところ、疑問な点があった場合はその都度教えていった。

実験では 12 人の被験者に図 6 編集前の図形が既に

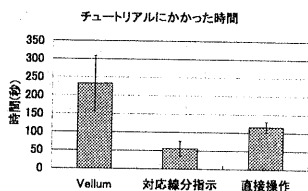
与えられているものとして、各図形要素を移動、拡大縮小、回転などの編集操作を行い、最終的に図6編集後の図形を完成させるといった操作を行ってもらった。

客観評価としてチュートリアルにかかった時間、編集操作にかかった時間、編集操作時にマウスをクリック・ドラッグした回数、マウスカーソルの移動距離を計測した。

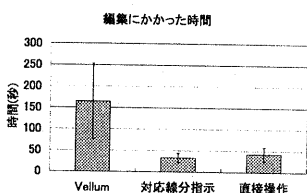
主観評価として被験者にアンケートとして二つの質問に答えてもらった。質問1では三つのツールの中でいくつかの項目について良いと思われる順に番号をつけてもらった。質問2では、各ツールについて質問を提示して当てはまるものにチェックをしてもらった。

4.2.2 結果

客観評価



チュートリアルにかかった時間



編集にかかった時間

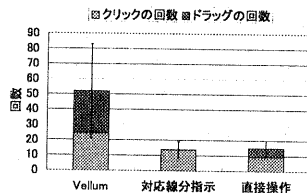
図9: チュートリアルにかかった時間と編集タスクにかかった時間

図9に各ツールの最低限の使い方を教えるのにかかった平均時間と与えたタスクを終了するのにかかった平均時間を示す。

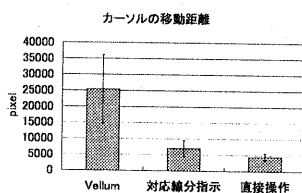
チュートリアルに一番時間がかかったのはVellumである。編集にかかった時間もほぼチュートリアルにかかった時間と同じ傾向が見られる。しかし、対応する線分の指示による方法と直接操作の開きがチュートリアルに比べ、小さくなっている。

図10に与えたタスク中にマウスをクリック・ドラッグした平均回数とマウスカーソルの平均移動距離を示す。

クリックとドラッグの回数の和はVellumが一番多い。対応線分の指示による方法と直接操作ではほぼ同じ程度の回数になっている。カーソルの移動距離は直接操作による方法が一番短い。



クリック・ドラッグの数



カーソルの総移動距離

図10: 編集タスク中に行ったクリック・ドラッグの回数とカーソルの総移動距離

主観評価(アンケート)

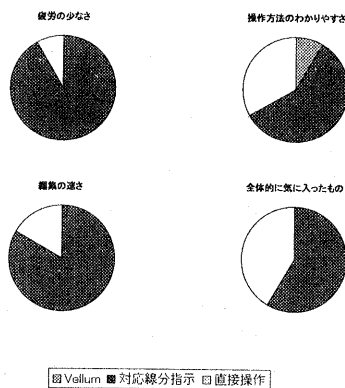


図11: アンケートで一位になったものの割合

図11に質問1で順位が一位になったものの割合を示す。

疲労の少なさ、編集の速さでは圧倒的に対応する線分の指示による方法が一位を占める割合が大きい。これは与えたタスクが線分の指示による方法が一番適していたためと思われる。

操作方法のわかりやすさ、全体的に気に入ったものでは線分の指示による方法の割合が減り、直接操作による方法が一位になる割合が増えている。

また、質問を提示して（使いやすい、覚えにくい、など）、当てはまる記述を選ぶというアンケート結果は次のようになった。Vellum は CAD ツールなのでやはり使い慣れていないと操作が難しいと感じている人が多いようである。操作方法のわかりやすさについては意見が分かれるようである。図形を回転、拡大縮小するときに中心点を指定するのが面倒だと感じる人は多かった。対応する線分の指示による方法は操作が簡単で覚えやすいという項目にチェックする人が多かった。また、楽しい、図を書くときに使ってみたい、役に立ちそうだという項目にチェックした人も半数程度いた。直接操作による方法は操作が簡単で覚えやすく、図を書くときに使ってみたい、役に立ちそうだという項目にチェックした人が半数を超えている。また、この手法の特徴でもある拡大、回転の中心点を自動的に移動するのがうれしい、移動と拡大、回転を切り替えずに使えるのが良いといった項目には過半数、全員がチェックしている。

4.3 考察

本研究で提案した二手法は必要最小限の機能の実装にとどめているのに対し、Vellum は図形編集とは関係のない機能までが使える状態で評価実験を行った。そのため、被験者による評価実験ではこのことが我々の提案する手法に有利に働いたと思われる。しかし、このような問題はあるものの限定された条件では十分に有用であると示されたと考えられる。

チュートリアル、編集作業に一番時間がかかったのは Vellum である。Vellum は図形操作時に細かい編集が可能であるという反面、すべてユーザが明示的に指示を与えなければならない。そのため操作が複雑で操作数も多く、誤り操作も起こり、時間がかかっているものと思われる。

編集にかかった時間は対応する線分の指示による方法と直接操作の開きがチュートリアル時間に比べ、小さくなっている。この事が示すのは、直接操作による方法は一度、使い方を覚えてしまえば編集作業を速やかに行えるということである。

クリック・ドラッグ数は対応線分の指示による方法と直接操作ではほぼ同じ程度の回数になっている。対応線分の指示による方法では位置、大きさ、角度を線分の対応から計算して求めているが、直接操作ではそれらの情報はユーザのカーソルの動きから得ている。同程度のクリック・ドラッグ数で同じ編集作業ができることから、直接操作による方法ではユーザのマウス

操作から得る情報を効率よく活用しているということがいえる。

カーソルの移動距離はユーザの視点の動きと解釈することもできる。対応する線分の指示による方法より、直接操作による方法の方がカーソルの移動距離が短い。これは、対応する線分の指示による方法が、対応する線分を指示した後、図形候補から目的の図形を選ぶ作業が必要になる一方、直接操作ではカーソルの移動は移動元から移動先だけでよいためである。このことから、直接操作による方法では、ユーザは編集したい図形のみ集中していればよいため、思考の中断が起こらないといえる。

5 まとめ

本研究では、幾何学的図形描画支援の手法を二つ提案した。

一つは、対応する線分の指示による方法で、編集する図形の移動元の線分と移動先の線分を指示し、二線分の対応から図形を変形するものである。もう一つは、直接操作による方法で、図形を移動、回転、拡大縮小する際に、編集図形の頂点が画面上の点にスナップされるというものである。

また、そのプロトタイプシステムを実装し、評価実験を行い考察を加えた。実験は、理想的な操作数で図形を編集したときのマウスの操作数を比べる静的評価と、被験者を使って描画実験とを行った。

その結果、被験者を使った描画実験では与えられた課題に対し、いずれの手法も編集時間において CAD システムに比べ、四倍程度の時間短縮がみられた。線分の対応による方法は用途は限られるものの初心者でも素早く正確な幾何学図形の描画が可能であることが示された。直接操作による方法は、客観評価としては線分の対応による方法に劣るものの、学習効果が高く、アンケート結果からはわかりやすく、役に立つ方法であることが示された。

参考文献

- [1] 五十嵐健夫, 松岡聡, 河内谷幸子, 田中英彦, "対話的整形による幾何学図形の高速描画", 情報処理学会論文誌 (Vol.39 No.5), pp.1373-1384, 1998.
- [2] 原田泰徳, 宮本健司, "Visible 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.
- [3] Ashlar 社 Vellum 3D (<http://www.ashlar.com/Products/3D/3d.html>)