Web ベース設計レビューのための 3Dデータへのアノテーション手法

正員 増田 宏*
非会員 和田 顕男*

学生員 吉岡康博*
正員 大和裕幸**

Annotations to 3D Models for Collaborative Design Review

by Hiroshi Masuda, *Member* Yasuhiro Yoshioka, *Student*
Akio Wada, *Non-Member* Hiroyuki Yamato, *Member*

Summary

In developing large-scale products, it is important to review the design of products from multiple perspectives and to prevent inconsistency in design. Web-based information sharing is very promising for realizing efficient design reviews. In this paper, we propose a design review system based on 3D models shared on the Web. We call comments and locations defined on a 3D model as annotations. In our system, annotations on 3D models are stored in a client-server framework, and can be shared among the design team. We propose four types of annotation methods, which consist of billboards, direct 3D painting, 2D drawing on a snapshot, and feature extraction. Since all of them are defined using 2D strokes and transformation matrices, they can be very easily and interactively specified by reviewers. These annotated regions are associated with comments, and are shared by designers through network. We implemented our review system and applied it to 3D models represented in the VRML format.

Key Words: Design Review, Annotation, 3D CAD, Collaborative Design, Web-based System

1. 結 言

手戻りの少ない製品設計を行うためには、設計・生産に関する様々な要素を総合的に検討することが必要である。そのための有効な方法の一つは、基本設計の段階で設計データを下流工程に公開し、各部門での専門的な立場から多面的に設計検討を行うことである。それにより、設計が詳細化される前に問題点を発見することができ、設計品質の向上や手戻りの減少が期待できる。

このような試みの一つとして設計レビューが以前から行われてきた。これまでは、関係者を同一場所に集めてレビューを行っていたが、組織や地理的な制約などから多頻度のレビューは難しいという問題があ

った。近年では、ネットワークの発達によって、Webベースの設計情報の共有や設計レビューが可能になっている。また、レビュー結果を技術標準やノウハウとして定式化し、共有データベース上にチェックリストとして蓄積して再利用しようとする試みも行われつつある。

Fig.1 にこのような環境下での設計レビューの概念図を示す。設計者は、設計案ができると、チェック

Fig.1. Design review

* 東京大学大学院工学系研究科

**東京大学大学院新領域創成科学研究科

リストと照らし合わせて設計の検証を行う。問題がないと判断すれば設計を公開して、設計レビューを受けるフェーズに入る。レビューによって問題が見つければ設計者に伝達して設計改善を促し、しばしば共同で改善作業が行われる。このような設計レビューの内容がデジタル文書として蓄積され、再利用が可能になれば、組織力の強化に有効であると思われる。本論文では、このような仕組みを実現するための Web ベースシステムについて考えていく。

設計に対するレビューは、紙の図面であれば、該当箇所に対して、コメントを書き込む作業となる。この作業を計算機化した場合には、デジタル情報に対して注釈付けを行う作業となる。一般に、デジタル情報に対する注釈付けはアノテーションと呼ばれ、デジタル文書、画像や映像など、デジタルメディアの特定部分に対してメタデータを付ける作業を総称する用語として用いられる。

ここでは、製品設計に対するアノテーションについて考え、注釈内容をメタデータ、また、注釈を付加する対象部分をアノテーション領域と呼ぶことにする。メタデータとアノテーション領域が適切に関連付けられて閲覧可能になれば、コミュニケーションのツールとして利用できるだけでなく、知識の蓄積にも有効である。

船舶設計においては、設計内容は 2D 図面または 3D CAD データとして表現される。通常は、この両者が混在していると考えられる。ただし、船舶設計においても設計の 3 次元化が広く普及してきており、3D データを活用した設計支援環境のニーズが高まっている。したがって Web 経由で設計レビューを行うには、図面のみならず、3D データにも対応できることが望ましい。図面に対するアノテーションは画像に対する手法を応用することで実現可能であるが、3D モデルへのアノテーション手法はまだ定着しているとはいえない。そこで、本研究では、主として 3D モデルを対象としたアノテーションについて考える。

3D データは、設計内容の直感的理解が可能で、加工や再利用も容易という利点があるため、情報交換の目的で利用しようとする試みが注目されている。ただし、3D データは 3 次元空間中に定義されているので、注釈を付ける領域を指定することが画像よりも難しいという問題がある。

多くの 3D CAD では、モデルを構成する面や稜線などの位相要素に対して属性が付加できる仕組みが実現されている。しかし、その仕組みをアノテーションに用いる場合、アノテーション領域に応じて位相要素を分割し、モデルの表現方法を変更する必要がある。

このような分割は、構造解析の境界条件を付加する場合などに用いられてきた。しかし、本目的においては、設計情報を多数のメンバー間で共有することが主目的となる。その場合、複数の設計者でアノテーションを共有しようするとモデルのバージョン管理が煩雑になるため、現実的な運用を行う上で、元のモデルを改変することは望ましくない。

また、3 次元処理は多くの場合、2 次元処理よりもユーザインタフェースが複雑で操作も難しい。そのため、3D CAD のようなトレーニングを必要とせず、図面にペンで書き込むような簡単さでアノテーションの記述を行える仕組みを考える必要がある。

そこで、本研究では、注釈付けを行っても元の 3D データを変更せず、かつ、ユーザによる画面上のストローク入力だけからアノテーション領域の指定が行える方法を用いる。本研究では、主として、3D データに対するアノテーションについて考えるが、図面も本手法の特殊ケースとして扱うことができる。

次章では、3D モデルに対するアノテーション手法について概観し、3 章では、本研究で用いるアノテーション手法、4 章ではアノテーション管理とシステム構成、5 章では適用結果、6 章で結論を示す。

2. 3D データのアノテーション

Fig.2 に 3D モデルに対するアノテーション付加の例を示す。アノテーションの記述では、3D モデル上または空間中にアノテーション領域を指定し、それに対するメタデータを保持する必要がある。

既に述べたように、位相要素の属性としてアノテーションを付加する方法は処理が煩雑になり、また、アノテーション手法が特定の CAD システムに依存する。そのため、本研究のように多数の部門の協調を支援するためには適していない。また、これまでいくつかの

Fig.2. Annotations for 3D models.

商用のアノテーションシステムも開発されているが、画面のスナップショットに上書きするものであったり、アノテーション領域が点でしか指定できなかったりするなど機能が不十分であった。

意匠設計の分野では、複数の設計者が 3D データに対するアノテーションを交換するための方法が提案されている。それらはアノテーション領域の種類に応じて以下のようにまとめられる。

- (1) 空間内の一点にマーカーを配置、その地点に対する注釈を記述する方法¹⁾²⁾³⁾。
- (2) 空間中に透明な平面を配置してその平面上にドローイングを行い、それに対する注釈を記述する方法⁴⁾。
- (3) 3D モデル上にドローイングを行い、それに対する注釈を記述する方法⁵⁾。

これらの手法は、基本的にはユーザは 2 次元のストロークを描画するだけなので、3 次元処理の煩雑さが避けられ、容易なアノテーション指定が行える。また、ネットワーク経由でデータ交換を行う場合にも、2 次元のストロークデータを転送すればよいので、データ量も少ないという利点がある。

しかしながら、設計レビューに応用するためには、同一のモデルに付けられた多数のアノテーションを適切に管理する仕組みが必要である。また、機械設計においては、アノテーションを付けたい対象がフィーチャであることも多い。フィーチャとはリブや穴などの特徴的な部分形状のことであるが、このような領域にもアノテーションが付けられるような仕組みを考えることが必要である。

そこで、本研究では、以下のようなシステムを構築する。

- (1) クライアント・サーバ方式で、同一の 3D データを多数の人が共有し、それに対してアノテーションを付加できる。その際、Fig. 2 に示すように、アノテーションと 3D モデルは独立に保持される。
- (2) 形状特徴を含む多様なアノテーション領域が指定できる。
- (3) CAD に習熟していないユーザでも直観的に利用できる。また、アノテーションの閲覧が特定の CAD システムとは独立に行える。

本論文では、このようなシステムを構築するためのフレームワークを示し、プロトタイプを構築する。以下において、本研究で用いたシステム構成、アノテーション付けの方法、スレッド管理の方法について示す。

3. アノテーション領域の指定

(a) Lines on a 3D model.

(b) 3D lines on a billboard.

(c) 2D lines on a drawing plane.

(d) Regions on a 3D model.

Fig.3. Types of annotated regions.

3.1. 基本的な考え方

本研究では、ユーザの画面上のストローク入力だけからアノテーション領域の指定が行える方法を考える。それによって、アノテーション領域の記述と3Dデータの記述が独立して扱え、簡単なアノテーション記述を可能にする。

ここでは、Fig. 3 に示すように、アノテーションを4通りに分類し、状況に応じてアノテーション領域を指定できるようにする。(a)-(c) は従来手法をベースにしたものであるが、(d) は本研究で新たに導入したアノテーション手法である。この図において、(a) はモデル上にインタラクティブに図形を描く方法、(b) は、ビルボードと呼ばれる透明な板の上に平面図形を描く方法である。(c) は特定の視点から見た画面上に直接描画を行う方法で、3Dモデルのスナップショットや2D 図面に対するアノテーションがこの場合に相当する。(d) はストロークから自動的に領域抽出を行う手法である。これらの手法を適宜組み合わせることで3D モデルに関連したアノテーションを柔軟に定義する。いずれの場合も、変換行列と2次元ストロークによってアノテーション領域を記述することができる。

3D モデルの曲面表現や位相構造はCADシステムによって異なっている。この差を吸収するために、内部的には、三角形分割モデルを用いる。本手法では、アノテーションの参照時にストローク情報からアノテーション領域を計算する。そのため、三角形分割処理を3Dデータ入力時に行えれば、任意のフォーマットのCAD データを扱うことができる。

3.2. 3Dドローイング

3D ドローイングは、Fig. 3 (a) に示すように、3D モデル上にストロークを描くことでアノテーション領域を指定する。Fig. 4 にその投影モデルを示す。ユーザの描いた画面上の線分列は、画像平面上の点列 $\{P_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$) となる。次に、カメラ中心から点 P_i を通る光線とモデル表面の交点 M_i を計算する。モデル上の線分列を高速に計算するために、 M_i に隣接した三角形を描画面上に投影し、モデル上の線分を算出する。モデル上の線分列を再構成するためには、モデルの変換行列、視点変換行列、画像平面上のストロークがあればよい。

3.3. ビルボード上のストローク

ビルボードとは3次元空間中に定義された透明な平面である。Fig. 3 (b) (c) にビルボード上に描かれた図形の例を示す。ビルボードとして、視点依存と

Fig. 4. Perspective projection of strokes.

Fig. 5. Feature extraction.

Fig. 6. Flow network of a dual graph.

Fig. 7. Model layers and Annotation layers.

視点非依存の 2 種類がある。2 次元的なスケッチの場合、Fig. 3 (c) のように、視点が変わると不整合が生じる。この場合には、アノテーション領域は特定の視点の場合のみ意味を持つ。したがって、表示を行いたいときは 3D モデルを元の位置に戻す処理と組み合わせる。

一方、Fig. 3 (b) のように平面図形を描きたいときには、ビルボードの位置決めを行ってからストロークを描く。位置決めは、描画平面を固定したのち、マウス操作によって奥行きを制御を行う。

いずれの場合も、ビルボード変換行列、視点変換行列、ストロークを保持することで、アノテーション領域が再構成できる。

3.4. 領域抽出

3D モデルへのアノテーションでは、リブや穴などの特徴的な部分形状を対象にしたいことは多い。たとえば、Fig. 3 (d) では、円筒部がフィーチャとして選択されている。

ストロークだけから正確な領域を抽出するために、特徴抽出アルゴリズムを導入することとする。ここでは、Fig. 5 に示すように、幅の広いストロークを 3D モデル上に描き、そのストロークと交わる面を選択する。ここでは、特徴領域の境界付近をラフに指定する。裏側の面も選択されるので視点を変える必要はないが、複数視点からの境界指定を行うこともできる。選択されたデータに基づいて、自動的に正確な領域を計算する。それによって、指定に要する時間を短縮することができる。

計算法としては、三角形の面間角度が相対的に大きいエッジを探索して分割領域を決定する方法が考えられるが、局所探索では平坦な部分での境界の同定が難しい。また、ノイズのために正しく境界が設定できない、ジグザグな境界ができやすい、という問題が生じる。そこで、我々は、局所的な探索手法は取らず、全体の最適化によって分割領域を決める方法を採用する。そのための手法がいくつか提案されているが⁶⁻⁸⁾、本研究に適した手法として、Kats らの提案した方法⁹⁾を用いることとした。

この方法では、Fig. 6 のように、面をノード、エッジをアークとする双対グラフを作成する。この図では、元のメッシュを破線、その双対グラフを実線で示している。次に、各アーク (i, j) に対して、面間の角度に応じた流量 $C(i, j)$ を設定する。その上で、Fig. 6 のように、ソース S とシンク T を設定し、ソースからシンクに至る流量が最大になるような流れを設定する。このとき、ノードを二つの集合 V と $\bar{V}$ に分

割し、 V と $\bar{V}$ にまたがるアークの集合を $E(V)$ とする。このとき、 E の流量の総和が最小となるような分割は最大流最小カットと呼ばれるが、このエッジを領域の境界とする。この計算は、Ford-Fulkerson アルゴリズム⁹⁾を用いて行う。

アークの流量は以下の式で決める。この式は Kats らによって経験的に決められたものである。ここで、 α_{ij} は隣り合う三角形 i と j のなす角度を示す。 η は定数で、凸領域では 0.1、凹領域では 1.0 の値を取るものとする。

$$d(i, j) = \eta(1 - \cos \alpha_{ij}),$$

$$C(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{d(i, j)} & (i, j \neq s, t) \\ 1 + \frac{d(i, j)}{\text{average}(d(E))} & (i, j = s, t) \end{cases}$$

この方法では、かならず二つの領域に分割され、また、我々が評価した結果では、ノイズを含んだモデルでも安定した解が算出でき、平坦な部分でも境界として検出できるので本研究の目的に適していると考えられる。

この方法を用いれば、面上の領域を指定するのに三角形の面の集合を保持する必要はないため、モデルとアノテーションを独立に保持することが可能となる。領域を再構成するために保持しておくべきデータは、モデルの変換行列、視点変換行列、ストロークである。

4. アノテーションの管理

協調作業の多くは、プロダクトモデリングではなくレビューであると考えられる。すなわち、開発に参加するメンバは一律でフラットな関係ではなく、設計

Fig.8. System configuration.

に責任を持つ設計者と、それ以外のレビューアに分けられる。レビューアは、提案された設計案を個々の役割である設備、組立、溶接、加工、保守などの評価指標に照らして検討し、提案者はそのフィードバックをもとに設計案を修正し、再度提示するというサイクルとなる。

本研究ではこのような活動を支援するために、一つの設計単位をプロジェクトという概念で扱う。Fig. 7のように 1 つのプロジェクトはモデル層とアノテーション層を持ち、その時系列に沿って積み重ねられる。

アノテーション層はアノテーション領域とメタデータの組み合わせで構成されるレイヤである。3D モデルに注釈が新たに付けられる度に、新しいアノテーション層が積み重ねられる。

モデル層は 3D モデルまたは図面を参照する。モデルに対して修正が加わり、新たな設計案が公開されると新たなモデル層が積み重ねられる。本研究では、製品モデルとアノテーションが独立に管理できるため、アノテーションを新しいモデルに移行させることが容易である。

本論文で述べた手法に基づいて、Fig. 8 に示すコンポーネントから構成されるクライアント・サーバ方式の設計レビューシステムを構築する。

クライアント側で作成されたアノテーションはサーバ側のアノテーションリポジトリに保管され、製品モデルとは独立に管理される。クライアントシステムは、JAVA を用いて構築されており、アノテーション領域を指定するためのコンポーネントとビューアとから構成される。サーバ側は、Servlet と PostgreSQL データベースを用いて実装されている。

5. 適用結果

いくつかの 3D モデルに対して本システムを適用した事例を Fig. 9 に示す。これらの図は、クライアント側のインタフェース画面を示している。ユーザはこの画面上に 3D モデルを表示して、ストロークを描画する。アノテーション領域を指定すると、テキスト入力画面が現れ、テキストをメタデータとして入力する。

アノテーションの閲覧においては、サーバから 3D モデルに関連するアノテーションが読み込まれ、ストロークからアノテーション領域が再構成されて、3D モデルとテキストが関連付けられる。形状データとアノテーションは相互に関連付けられており、特定のアノテーションを指定すると、アノテーションを指定したときの位置に自動的にモデルが移動するようになっている。ユーザの指定により複数のアノテーション

(a) Ship structure.

(b) Ship full form.

(c) Mechanical part.

Fig.9. Examples of annotations.

Fig.10. Calculation time for feature extraction.

領域を同時に描画することもできる。

Fig. 9 (a) は、3D ドローイングを用いて作成されたアノテーションである。(b) は、3D ドローイングとビルボードによってアノテーションを作成した例である。(c) は、ストロークから抽出された領域に対してアノテーションを付加した例である。

(a) (b) については、単純な計算のみなので計算時間は非常に短い、(c) では、最大流最小カットの最適化計算が必要となる。Fig. 10 は、本研究で実装したアルゴリズムの計算時間である。面の個数は、ストロークが投影された面の個数なので、通常は数十個程度であり、レスポンス時間は非常に短くなる。

いずれの場合も、ストロークのみによってアノテーション領域の指定が行え、そのメタデータを記述することができる。また、計算負荷は非常に軽いため、リアルタイムにアノテーションの作成・閲覧を行うことが可能である。

6. 結論と展望

本研究では、設計レビューに必要な要件について示し、3D モデルに対するアノテーション手法として、3D ペインティング、ビルボード描画、領域抽出を 2 次元のストロークから行う手法を提案した。本手法に基づいて、設計レビューシステムのプロトタイプシステムを構築し、リアルタイムでのアノテーションが行えることを確認した。

今後は、本システムを現実の設計で利用するために、システムの作りこみを行う必要がある。現時点での実装では、VRML データのみに対応しているが、曲面を含んだ形式への対応も考えていく。また、現時点では、Fig. 9 に示すような比較的単純な 3D データを扱っているが、大規模なデータについては、転送や表示の高速化が必要であり、その方法についても考えていく。

参考文献

- 1) M. M. Loughlin and J. F. Hughes: Annotation System for 3D Fluid Flow Visualization. Proceedings of the Conference on Visualization '94, IEEE, (1994), pp.273-279.
- 2) C. M. Adriano, A. B. Raposo, I. L. M. Ricarte and L. P. Magalhaes: Changing Interaction Paradigms in Annotation Environments, MEDIA, (2000).
- 3) T. Jung, E. Y. Do and M. D. Gross: Immersive Redlining and Annotation of 3D Design Models on the Web, Proc. of 8th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, (1999), pp.81-98.
- 4) T. Jung, M. D. Gross, and E. Y. Do: Space Pen: Annotation and Sketching on 3D Models on the Internet, Proc. of 9th International Conference on Computer Aided Architectural Design Futures, (2001), pp.257-270.
- 5) R. D. Kalnins, L. Markosian, B. J. Meier, M. A. Kowalski, J. C. Lee, P. L. Davidson, M. Webb, J. F. Hughes and A. Finkelstein: WYSIWYG NPR: Drawing Strokes Directly on 3D Models. Proceedings of ACM SIGGRAPH, (2002), pp.755-762.
- 6) A. P. Mangan and R. T. Whitaker: Partitioning 3D surface meshes using watershed segmentation, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 5(4), (1999), pp. 308-321.
- 7) B. Chazelle, D. P. Dobkin, N. Shouraboura and A. Tal: Strategies for polyhedral surface decomposition: An experimental study, Symposium on Computational Geometry, (1995), pp. 297-305.
- 8) S. Katz and A. Tal: Hierarchical Mesh Decomposition Using Fuzzy Clustering and Cuts, ACM Transactions on Graphics, 22(3), (2003), pp. 954-961.
- 9) D. R. Fulkerson and L. R. Ford, Flows in Networks, Princeton Univ. Press, (1962).
- 10) 和田顕男, 3D コンテンツへの注釈付けによる協調作業支援環境に関する研究, 東京大学環境海洋工学専攻修士論文, (2003).
- 11) 増田宏, 和田顕男, 大和裕幸: Webを用いた協調設計のための設計変更管理に関する研究, 造船学会秋季講演会, (2003).