プロダクトモデルに基づく鉄道台車 CAD システムの開発*

酒井利彦** 薄木栄治*** 村上幸己*** 木村文彦† 伊藤俊太郎††

Railway Bogie Truck CAD System Based on Product Modeling

Toshihiko SAKAI, Eiji USUKI, Yukimi MURAKAMI,
Fumihiko KIMURA and Shuntaro ITOH

Recently CAD/CAM has been applied in many fields to achieve high level automatization in design and manufacturing process. The current approach in mechanical industrial field is a partial automatization that replaces drafting and machining procedure (NC programing) with a computer process. This type of approach is not enough in higher level design process and manufacturing process, because it uses only geometry and can't resolve the treatment of inherited technical knowledge in design and manufacturing. This is an important problem in practical design and manufacturing. A distributed type of intelligent CAD system was developed at the authors' company for the purpose of improving productivity and quality in both construction of design process and manufacturing process. The principal feature of this system is as follows: After the fundamental design is executed by the intelligent CAD system based on the object-oriented database, the attributes of geometry and design information (or design contents) that is generated from the intelligent CAD drive the conventional CAD systems simultaneously.

Key words: CAD, intelligent CAD, product modeling, attributes modeling, object-oriented database, concurrent engineering, inherited technical knowledge

1. はじめに

近年、設計・生産の高度自動化のため CAD/CAM 技術が多く分野で活用されている。筆者らの属する設計部門でも昭和 55 年に CAD システムを導入して以来、台車・輪軸・クランク軸等数多くの設計・製図・金型製作作業に活用してきた^{1)~4)}。

しかし、従来の CAD システムの鉄道車両分野での活用方法は、製図機能の置換え、一部構成部品の干渉検討等、部分的な自動化のみであり、基本構想の段階から、詳細設計、製図に至る一連の設計作業は熟練した設計者の手作業が主体になっている。

この間、鉄道車両用台車の設計に対して、設計工期の短縮、設計品質の向上、設計の標準化に対するニーズが高まり、技術伝承問題も含め、従来の方法ではそ

の要求に対応しきれなくなってきた。

前述のニーズに対応すべくプロダクトモデルの概念に基づくインテリジェント CAD システム構築ツールを用いて鉄道車両用台車 CAD システムを開発した。プロダクトモデルとは、設計対象モデルと設計作業モデルからなり^{5)~7)}、本事例は前者を米国 ICAD 社のインテリジェント CAD 構築ツールである ICAD (日本名 IMPAKT)⁸⁾ を用いてモデル化し、後者に鉄道台車設計作業を分析することによって基本設計システムと既存システムとを併用し、基本設計システムをさらに 5 つのクラスに分類することによって設計作業のモデル化を行った。詳細は 3.2 項で説明する。

2. 鉄道車両用台車設計

システム化の対象とした鉄道車両用台車 (図 1) とは乗客の“居住空間”としての車体を支持し、安全・快適にレールを走行する“走り装置”であり、約 800 点に及ぶ部品を有機的に構成したものである。

鉄道車両用台車は家電・自動車等の見込み生産品に対し、受注生産品であり、顧客固有の詳細な要求仕様

* 原稿受付 平成 3 年 9 月 4 日

** 正会員 住友金属工業(株) (大阪市此花区島屋 5-1-109)

*** 住友金属工業(株)

† 正会員 東京大学工学部 (東京都文京区本郷 7-3-1)

†† 住友金属工業(株) (大阪市中央区北浜 4-7-28)

Fig. 1 Standard bogie trucks

(慣習)まで満足させる必要がある。この要求仕様には路線条件、保守条件、安全条件等があり、各鉄道会社別に異なっている。このような種々の制限の中で、約 800 点に及ぶ部品を構成するために設計者は、設計基準に基づいた各種の検討を行う能力、あるいは顧客の慣習にまで精通しているといった熟練が要求されている。

3. システムの開発目標と内容

3.1 システムの目標

鉄道車両用台車設計は大別すると、技術的な新規性を持つ開発設計と、技術的に成熟した一般設計がある。一般設計の自動化システムに絞って本システムの開発は下記の目標を設定した。

- (1) 基本設計から詳細設計、製図に至るまでのトータル的なシステムとする。
- (2) 設計手法の標準化(部品の標準化も含む)を推進する。
- (3) 種々の定式化されていない項目、顧客の慣習までもデータベース化する。
- (4) 将来的には、製造、工程管理等への支援も考慮する。

また効果として、(a) 設計品質向上、(b) 設計工期短縮、(c) 標準化、(d) コストダウン、(e) 技術伝承を掲げている。

3.2 システム構成

3.2.1 システム設計方針

従来手法は個別アプリケーション単位でモデル入力作業を行うためデータの一元的な管理が複雑であった。そこで本システムは「基本設計から詳細設計、製図に至るまでのトータル的なシステム」開発のために、プロダクトモデルと従来型 CAD システムとを併用した分散型システム構成をとった。将来はプロダクトモデルだけでシステム構築する予定であるが、実用的にはプロダクトモデルで概念設計/基本設計情報を生成し、この情報を活用して既存 CAD システムで再入力する手間を極力排除することを目指した。

受注生産品である台車設計の中でも一般設計と呼ばれる比較的流用設計比率の高い分野にこのインテリジェント CAD 構築ツールを利用することにより、従来別々のシステムで処理していた設計計算、設計カタログ資料をクラス表現で統合化し設計手法の管理を容易にした。また本ツールの特性を活かすため、入力諸元でのみシステム全体を制御し、すべての干渉検討結果を一気に出力する部品構造を a_part_of 関係で表現した。例えば部品の一つである電動機を a_kind_of 関係である駆動系ユニットと表現するよりも、a_part_of 関係と表現すれば部品間の属性継承処理が容易となり設計者の意図にも合い、システムの保守性も向上する。

従来の CAD システムが設計結果としての形状のみを扱っているのに対して、プロダクトモデル手法を用いることにより更に設計者の意図、設計手順といった設計ルールを属性情報として付加し、本システムは設計作業の初期段階で主要な設計項目を決定できるシステムを実現した。例えば 3.2.3 項で説明する部品配置処理は 3 つの設計ルールを利用している。

最後に本システムは「製造、工程管理等への支援」のために基本設計システムですべての設計技術を管理するために属性情報の形で製造、工程管理システムとのデータベースの共有化も図っている。

3.2.2 システム概要

本システムの全体フローを図 2 に示す。本システムは分散型システム構成をとっており、基本設計システムとその他の既存システムと大きく 2 つに分けることができる。基本設計システムはインテリジェント CAD 構築ツールを用いて、① 入力諸元、② 設計計算、③ 部品配置、④ 干渉動作/干渉部検出/干渉部表示、⑤ 属性整理出力(文書、部品構成表の自動作成)の 5 つのクラスから構成されている。既存システムは (I) 3 次元 CAD/CAM、(II) 2 次元製図 CAD、(III) 文書作成の 3 つのモジュールから構成されている。

まず設計者は、設計諸元を基本設計システムに入力する。基本設計システム内に記述した設計作業知識に基づき各種の設計計算を行い、次に設計標準ルールの検索、カタログ化された部品の検索を実行しながら、パラメータ化した部品形状の生成及び各部品の配置を行う。

また、鉄道車両用台車は走行時、経年変化時に、組立ユニット間で相対変位を生じ、部品相互間で干渉が生じる可能性がある。そのため本システムでは干渉の可能性の高い部位に対し、干渉部の検出を自動的に行うよう設計した。

Fig. 2 Railway bogie truck CAD system

Default values of the fundamental design for bogie truck (Input specifications)	
(def-spec fundamental-design-bogie : : : : -input the specifications-	
: Gage type	: Narrow gauge
: Gage	: 1067
: Wheel base	: 2100
: New wheel diameter	: 860
: Journal diameter	: 120
: Axle center diameter	: 162
: Upper level of air spring	
: Supporting distance of air spring	: 968
: Longitudinal beam center distance	: 1850
: Axle box center distance	: 1640
: Brake center distance	: 1640
	: 1148

Fig. 3 Design specifications

次に個々の処理結果として、決定された部品属性(形状、寸法、配置等)、干渉検討結果(干渉部位の距離)を出力する。さらにその出力は他システムにネットワーク(Ethernet)を介して転送され、この出力結果を受けた各システムでは、3面図の自動作成、干渉検討図の作成、部品構成表の自動作成、報告書等ドキュメントの自動作成が同時並行的に処理可能である。また将来的には、FEM解析、高度な台車性能計算等とも連動することも検討中である。なお、基本設計システムはインテリジェントCAD構築ツールによって開発した。

3.2.3 各システムの処理内容

1) 諸元入力

まず設計者は基本設計段階で目標とされる設計諸元を図3に示す仕様形式に入力する。基本的に本システムは、全自動設計システムを目標としており、システム内でデータベースに登録された設計標準に基づき、外部入力としてはこの諸元のみを用いて設計計算、部品形状、寸法、配置が連動して駆動する方式をとっている。例えば設計計算はコイルばねという軸ばねタイ

プの諸元が入力された場合、コイルばね用の設計計算が起動する方式を取っている。

本システムは設計に必要な入力諸元「通常変数」と、顧客の特殊要求が設計に反映される「特殊変数」を用いてシステムを制御し、設計者は仕様形式への書き込み操作だけですむ。またシステム制御フローは(1)設計仕様モジュール書、(2)全体のシステムフロー書を整理することにより、設計者が必要な場合に情報を得ることができる。

2) 設計計算

設計計算部は構想・基本設計に必要な各種の設計計算を行っている。本システムは荷重条件検討、ばね計算、強度計算、性能計算、変位計算の5種類から成る。例えばばね計算の項目はコイルばねのたわみ量計算、空気ばね有効径/内圧/沈下量計算ほかを、強度計算の項目は側バリ、輪軸の強度、軸受の寿命計算ほかを、性能計算の項目はブレーキ性能計算ほかを、変位計算では干渉検討時の各部品ユニット間の可動変位量計算を実行する。

このクラスは基本設計後に更に全体の静荷重強度解析として位置付けているFEM解析以外を指す。これは材料力学公式のみを利用しているのではなく、当社の長い設計経験、使用実績によって得られたより安全性と経済性の高い設計データに基づいている。従って、離散的で設計カタログ的なデータの中にはグラフによる内挿法により得られる設計値を利用して設計計算を行っているものもある。

3) 部品配置

鉄道車両用台車の各部品は、約100の構成要素に分解され、ツリー構造により有機的に結びつけられ一台車を構成している。図4は本システムの実行結果であ

Fig. 4 Parts layout

り、以下に述べる機能を用いて3次元の形状部品を配置した結果を上図、正面、側面、トリメトリック面の4方向からみた画面表示例である。次に、3つの機能からなる本モジュールについて説明する。

① 部品モデル選択機能

このクラスは当社の数多くの設計例をもとに、各部品構成要素について標準化を行い、形状のモデル化を行っている。入力された設計諸元あるいは設計計算部で計算された結果に基づき、最適な部品モデル（形状種別）を選択する。例えば具体的な表現は逆ポーランド記法ではあるが「もし取付種別が2番ならば、電動機タイプAを選択する」というルールも属性情報として宣言することが可能である。この時選択できるデータは位相幾何学的に異なる部品も選択できるため、より柔軟な設計ルール記述が可能であった。

② 形状・寸法の決定機能

①で形状種別が選択された後、形状パラメータを設計標準に基づき決定し形状生成する。例えば形状寸法の決定機能として既にパラメータ化した寸法値を設計カタログ資料のように標準化しておくことにより、表形式の寸法値を読み込む本ツールの機能を利用して形状を生成することが可能である。基本設計システムは3次元形状を生成しており、3次元的な部品形状の配置が確認でき、部品相互の干渉検討を行うことも可能である。なお、形状をいたずらに複雑化することは計算機の処理速度を遅くするだけであり、基本設計システムは必要な簡略形状を生成するにとどめている。詳細寸法については数値のみを決定しており、設計モジュールに記載しているモデル図と照合することにより製作図に反映させている。

③ 部品間の位置決定機能

①、②で選択、形状寸法が決定された各部品を部品間の相対的な位置決定知識に基づいて配置することにより、具体的配置を行う。例えば実際のルールとは若干異なるが「車両限界前面に対する電動機の相対位置＝車両限界車体幅/2－電動機台車中心間距離」のように部品間の位置関係単位で記述できるため設計者の意図がより表現しやすくなっている。

4) 干渉検討

鉄道車両用台車は走行時のばねのたわみ、曲線通過時の車体と台車の動き等、各部品ユニット間に相対変位が生じる。またブレーキ装置については、リンクシミュレーション的な複雑な動きが生じる。

設計時にはこのような相対変位を考慮に入れ充分なすきまを確保する必要がある。従来はハンドで検討を行うとともに、一部ではCADを用いた検討も行ってきたが、形状を生成することに手間がかかり充分に活用されてこなかった。

基本設計システムにおいては、すべての部品が自動的に生成されるため部品相互間の動きを計算し、実験上干渉の可能性の高い部位の3次元的な距離を自動計測することにより、干渉チェックを行っている。なお干渉検討は台車本体の動きと、ブレーキ装置の動きの2つに分けて行っている。

① 台車本体の動き

台車本体は大きく分けて、(a)車両限界、(b)ばね下、(c)ばね間、(d)ばね上の4つの構成要素に分けられ、それぞれの間で相対変位を起こす(図5)。相対変位の組合せは数多くあり、それぞれの動き量は設計計算部で求めている。

Fig. 5 Movements of bogie truck

② ブレーキ装置の動き

ブレーキ装置はリンク構造をしており、(a) 取付け時、(b) ブレーキ時、(c) 車輪・制輪子最大摩耗時、(d) 制輪子取外し時の4通りの動きを設計計算クラスより求め動作させている。

従来CADの手法は形状変更できない複数部品を用いて、この一つの組合せだけに対応したブレーキ装置のリンクシミュレーションプログラムを開発するだけでもかなりの時間を要していたため、限られた製品にしか適用出来なかった。そこで本手法により形状変更可能な複数部品を用いて、経験的に検討が必要な複数の組合せに対応可能なシミュレーションプログラムを短期間で開発することができた。つまり基本プログラムを開発したため今後は部品を新たに登録するだけで本シミュレーションが容易に実現できる目途がついた。

これら2つは従来の設計手順を生かし、設計工程別に部品配置、そして干渉検討結果を出力することが可能である。

5) 距離測定

干渉の可能性の高い部位は長年の設計経験から推測することができるため、干渉部位はあらかじめ部品形状の中に部位の名称を属性として指定している。干渉部位を構成する幾何情報は、平面、曲面、直線、曲線、点の5つに区分し、その組み合わせ方により距離の測定法が異なってくる。プロダクトモデルの手法により例えば車軸の干渉検討項目の幾何情報分類が点であるならば、部品形状に対象となる幾何形状定義項目を「車軸干渉点」と定義し、これを車軸部品形状に干渉部位名称の属性として記述することが可能である。更にこの部品形状に埋め込まれた干渉部位属性を利用する場合、距離測定プログ

ラムの干渉検討対象リストに「〈距離測定実行関数〉点と面：〈干渉部位組合せ名称〉車軸干渉点—車輪干渉面」というように属性名を直接記述するだけでよい。この結果干渉対象部位の属性を定義した部品の構成幾何情報の組合せすべての回数分の干渉チェックを行う手間が削減できる。

インテリジェントCAD構築ツールは点から線に垂線を落とした時の交点計算をもつが、これを利用して上記のような組合せの種類により独自の距離測定関数を開発した。例えば多点—多直線、多点—多曲線、多直線—多平面など多くの関数を開発した。

図6は点と多平面との場合における干渉要素間の干渉検出判定についての説明図である。干渉要素点 (point) と被干渉要素多平面との最短距離点 (3-dimensional minimum-distance point) は(a)のように法線ベクトルとの交点計算で得られる場合と(b)のように平面との境界線も計算する必要がある場合とに分類した。また干渉の有無については干渉要素点と最短距離点からなるベクトル $\vec{a}$ と干渉要素点と被干渉要素多平面内に必ず位置する仮想的な点 (side-point) からなるベクトル $\vec{b}$ との内積を求め、これが負符号をもつならば干渉があると判定した。

距離測定は数多くの部位の距離測定を行うため、前述の独自の距離測定関数により、インテリジェントCAD構築ツールのもつ距離測定機能をそのまま利用した場合に比べ、20倍の応答速度の高速化を達成した。今後は複雑な形状に対して更に最適なアルゴリズム開発を進めていく予定である。

図7は干渉検出を行った時の出力結果である。この表は一例として、3種類の干渉部位について21通りの干渉動作を行った場合の干渉対象部位間の距離を表している。例えば表右上の67.4 mmはNo. 230部位

Fig. 6 Interference detection judgment

NO.228(15.0) · NO.229(15.0) · NO.230(20.0) ·

1	159.7	●	118.6	●	67.4	●
2	113.2	●	110.8	●	56.9	●
3	129.7	●	110.8	●	61.7	●
4	171.1	●	110.8	●	61.7	●
5	143.8	●	146.4	●	46.1	●
6	164.1	●	146.4	●	46.1	●
7	202.9	●	146.4	●	46.1	●
8	75.8	●	77.1	●	56.5	●
9	93.6	●	77.1	●	71.7	●
10	137.6	●	77.1	●	66.3	●
11	125.8	●	110.8	●	51.0	●
12	142.3	●	110.8	●	61.7	●
13	186.3	●	110.8	●	58.4	●
14	158.9	●	146.4	●	46.0	●
15	180.0	●	146.4	●	46.1	●
16	215.7	●	146.4	●	46.1	●
17	88.4	●	77.1	●	53.1	●
18	106.2	●	77.1	●	66.5	●
19	150.2	●	77.1	●	61.6	●
20	178.2	●	82.5	●	51.0	●
21	201.2	●	82.5	●	45.8	●

Fig. 7 Interference detection results

の1通り目の干涉距離であり、必要な部品間のすきま量 20.0 mm よりも大きい場合●印が示される。もしこれを満たさない場合はシステムは×印を出して設計者に注意を促すことができる。

6) 図面作成

基本設計システム内で決定された形状寸法により製作図面を作成していく。基本設計システムは3次元形状データと形状寸法、計算結果や干渉部位などの属性データを生成するが、3次元形状データは基本設計時の干渉検出などに必要なレベルで登録しているため、製作図面作成段階ではさらに詳細な情報が必要となる。このため、本システムは2つの方式で製作図面を作成している。

第1方式は、寸法属性データを2次元/3次元CAD/CAMシステムに転送し、これをもとに製作図面の自動生成を行うシステムである。ただしこのシステムでは製作形状のパラメータ定義が必要であり、さらに形状生成後も記事欄、照合欄等の追記が必要である。第2方式は、従来の2次元CAD内の基本図を、

基本設計システムから出力された寸法属性データに基づき形状の変更点のみをオペレータが修正する方法である。

7) ドキュメント作成

基本設計段階で決定された各設計諸元を織り込んだ顧客に対する報告書を自動生成した。鉄道台車設計は顧客への了解を得るために顧客への報告書提出が義務付けられており、このシステムにより基本設計完了後同時に報告書出力が可能となった。

8) 設計部門用の部品構成表作成

基本設計段階の扱う鉄道台車部品点数は約 100 部品で必要十分である。しかし約 800 点からなる部品のうち設計生産の下工程で必要な約 300 部品に対しては不足している。そこでこれを補うため設計部門専用データベースとして部品構成表を構築した。現在の用途は部品構成表だけであるが、さらに広範囲の設計データを扱うシステムを検討中である。

4. ま と め

本報告では鉄道車両用台車にプロダクトモデルを用いたCADシステムの開発事例の報告を行った。

現時点において今後さらに展開していくための核となるシステムの開発が完了し、試験的に一部ユーザの台車設計に適用中である。今後実運用を継続的に行うことにより、設計知識を充実し、適用台車を拡大していく予定である。

謝 辞

最後にこのシステムの開発に当たって並々ならぬご指導、ご協力を賜った関係各位に対し厚くお礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 西村正哉：設計業務のシステム化について、鉄鋼の匠(日本鉄鋼連盟), 5 (1981).
- 2) M. Nishimura et al.: Application of CAD System of Hot Forging, Advanced Technology of Plasticity 1984, Vol. 1, (1984) 545-550.
- 3) 伊藤俊太郎ほか：型鍛造における3次元CAD/CAMシステム、日本能率協会主催CG-OSAKA '86講演会前刷集、FAにおけるCAD/CAM, (1986) A 2-7~A 2-13.
- 4) 吉井省三ほか：鉄道車両品設計におけるCADシステム、住友金属誌, 35, 3 (1983).
- 5) 鈴木宏正：機械生産情報統合化のための計算機内モデル構成法、東京大学博士論文, (1986).
- 6) 木村文彦：オブジェクト指向によるCAD/CAMのためのモデリングとデータベース、情報処理学会論文誌, 29, 4 (1988) 368.
- 7) F. Kimura et al.: Variational Product Design by Constraints Propagation and Satisfaction in Product Modeling, Ann. CIRP, 35, 1 (1986) 75.
- 8) R. E. Phillips and L. W. Rosenfeld: A Knowledge Based System for Design Automation, 6th Int. Symp. on Offshore Mechanics and Arctic Eng., (1987).