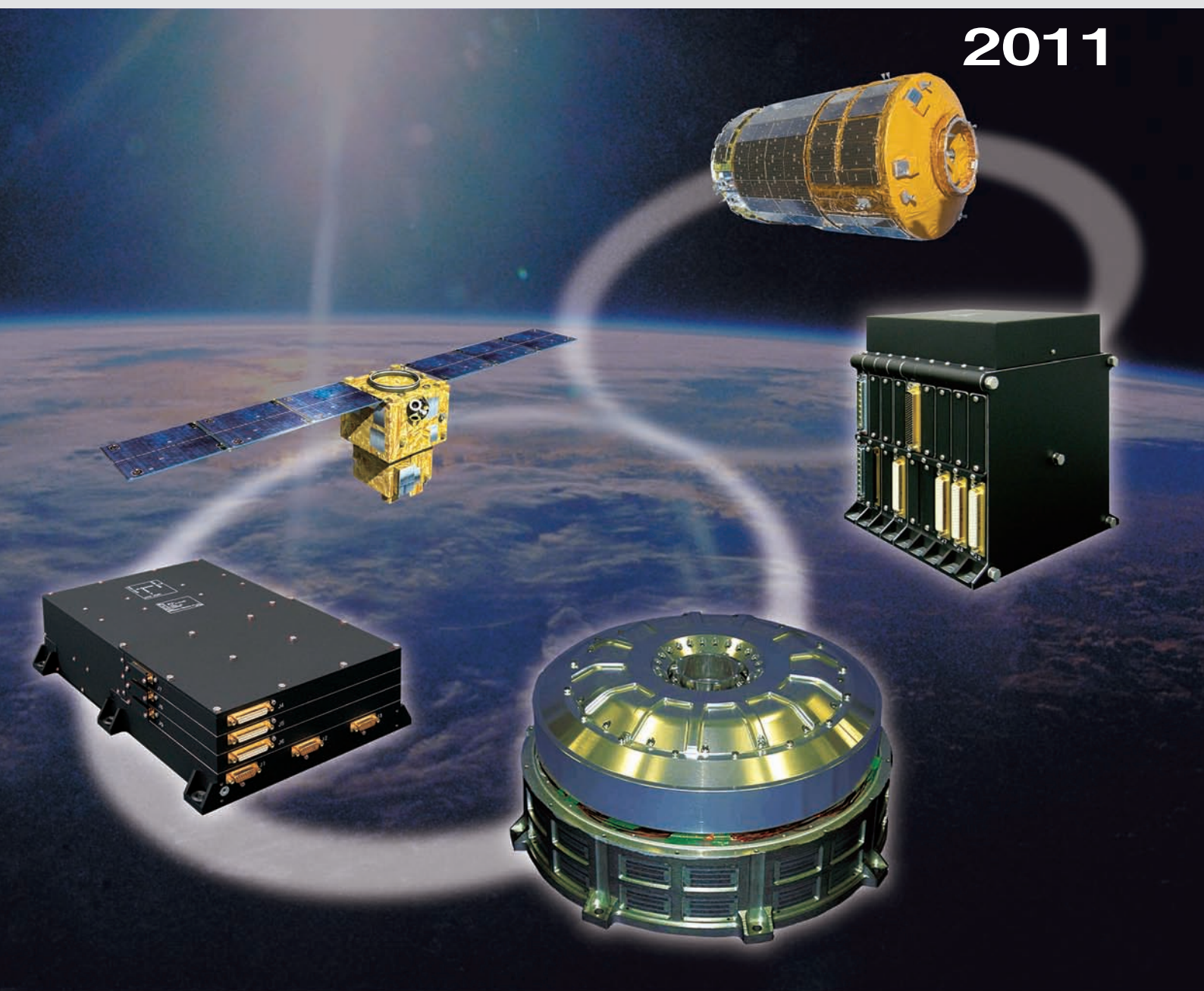


三菱プレシジョン技報

2011



表紙写真



「こうのとり」1号機



小型宇宙用
電子パッケージ

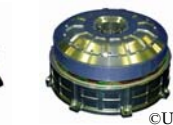


SERVIS-2



IRU

©JAXA



©USEF
磁気軸受けホイール

宇宙空間に浮かぶ JAXA^{※1} 殿の宇宙ステーション補給機「こうのとり」1号機 (HTV1^{※2})。

HTV は国際宇宙ステーションの運用に必要な物資輸送を行うもので、当社製の宇宙機器も重要な役割を担っています。円柱の形状をした HTV の頂部に当社が担当した電子パッケージの姿が確認されます。なお、HTV の周囲に配した機器は、開発中の小型宇宙用電子パッケージ(論文 pp.7)です。

※1 JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency
(独立行政法人 宇宙航空研究開発機構)

※2 HTV : H-II Transfer Vehicle

宇宙空間に浮かぶ USEF^{※3} 殿の衛星 SERVIS-2^{※4} のイメージ図。SERVIS-2 は、我が国の民生部品・民生技術を宇宙環境下で使用するためのデータベース構築に活用されており、当社製の宇宙機器も重要な役割を担っています。SERVIS-2 の周囲に配した写真の機器は、IRU^{※5}、及び SERVIS-2 での実証を目的に搭載された当社製の磁気軸受けホイールで、当社ではさらに IRU(論文 pp.13)や、ホイール(論文 pp.17)の小型化に取り組んでいます。

※3 USEF : Institute for Unmanned Space Experiment
Free Flyer
(財団法人無人宇宙実験システム研究開発機構)

※4 SERVIS : Space Environment Reliability Verification
Integrated System
(宇宙環境信頼性実証システム)

※5 IRU : Inertial Reference Unit

目 次

巻 頭 言

お客様のご要求に応じたソリューションの継続的な提供に向けて2
 取締役社長 鳥海 善裕

特別寄稿

超小型衛星が拓く新しい宇宙開発・利用4
 東京大学大学院工学系研究科 航空宇宙工学専攻
 大学院工学系研究科 教授 中須賀 真一

論 文

高密度化モジュール方式による小型宇宙用電子パッケージの開発7
 小川 智也, 田島 崇男, 棚橋 太地, 町田 忠広, 宮本 充

人工衛星搭載用TDG-I RUの小型軽量化13
 平田 晋吾, 小島 正人, 大地 一嘉

小型高速回転ホイール「5~10Nms タイプ」の開発17
 谷口 典史, 田島 崇男

ドライビングシミュレータ向け視界発生用データベース生成システム21
 林 隆伯, 川上 隆行, 中野 泰子

術前計画型手術シミュレータ用生体モデルデータ生成システムの開発29
 高波健太郎, 中山 聡, 長坂 学, 坂本英男, 後藤修一, 乾谷 徹, 本郷 新, 菊川孝明

マルチボディダイナミクスにおける高次ルンゲクッタ法による
 車両運動モデルのリアルタイムシミュレーション38
 佐々布 直明, 伊藤 広明, 大貫 正明

回転翼機の汎用シミュレーション技術44
 清水 昭彦, 栗原 佳一

P-3C 戦術訓練装置の概要と有効性, 及び運用支援について49
 林 勇己, 新井昌彦

QR コード駐車場システム53
 實松 佳樹, 橋立 勇氣

チケットレス宿泊車両認証駐車場システム59
 佐藤 均, 實松 佳樹

複数商業施設向け駐車場総合管理システムの開発64
 加藤 圭介, 館 和嘉, 遠藤 公高

お客様のご要求に応じた ソリューションの継続的な提供に向けて

取締役社長
鳥海 善裕

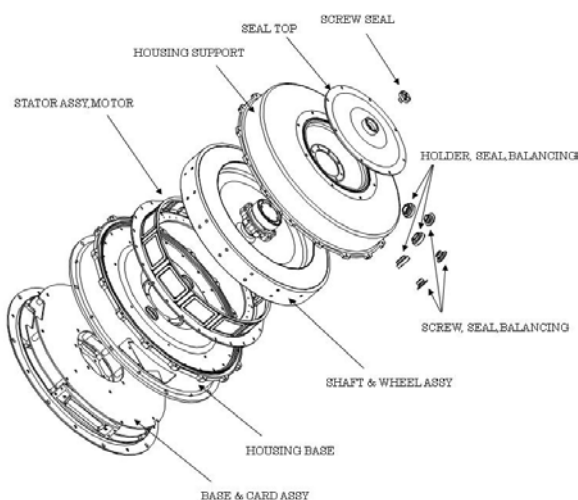


平素、三菱プレジジョン株式会社をご愛顧賜り誠にありがとうございます。三菱プレジジョン技報第6巻をここに上梓させていただきます。

三菱プレジジョン技報第6巻では、東京大学大学院工学系研究科教授で航空宇宙工学ご専攻の中須賀真一先生に、「超小型衛星が拓く新しい宇宙開発・利用」と題しての特別寄稿をいただきました。超小型衛星への取り組みに関して重要な「ほどよし」の発想についてご解説をいただくとともに、今後の超小型衛星大国を目指した取り組みの要点について、「ほどよし衛星」プロジェクトのリーダとしてのお立場からのご解説もいただいております。当社としての宇宙関連の論文としては、更なる小型化を目指す取り組みである「高密度化モジュール方式による小型宇宙用電子パッケージの開発」「小型IRUの開発」「小型高速回転ホイールの開発」の3論文を宇宙関連として記載をさせていただいております。小型、高性能、低コストについては、精密機器、製品の永遠の課題かとも考えており、今後とも積極的な開発を続けて、より良いものをお客様にお届けしたいと存じます。

また、一般論文として、シミュレータ関連では、「ドライビングシミュレータ向け視界発生用データベース生成

システム」「術前計画型手術シミュレータ用生体モデルデータベース生成システム」の2論文において、いずれもシミュレーションのためのデータベースの生成、現実の状況の適正な把握、について検討をさせていただきました。シミュレータは、仮想の現実の中での訓練等を通じてご利用をいただいておりますが、今後はいかに現実をよく模擬するかにとどまらず、多様に变化する現実をいかに早くシミュレータに取り入れ、シミュレーションの結果を現実にフィードバックして行くか、の視点が重要になって行くかと考えます。地図や標高、航空写真といったデータから、シミュレーションをおこなうための視界発生データベースをいかに構築して行くかについての開発と、医療用のシミュレータとして、患者さんそれぞれのCT断層のデータから3次元のデータを作成する術前計画型手術シミュレータ用いるかについての開発をご紹介します。分野こそ変わりますが、いずれも、今までのシミュレータがオーダーメイドだとすると「オーダーメイドのシミュレータ」への道を拓いていくものと考えております。それぞれ、分野は異なりますが、技術の底流として新しいシミュレータの流れと、新規の利用の芽を拓いていけるものと期待しております。



小型衛星向けの小型高速回転ホイール



回転翼シミュレータのcockpit

当然ながら、いかに現実をよく模擬するか、についても当社はたゆまぬ開発努力を続けており、以下の論文ではそれらの一環として、車両運動モデルのリアルタイムシミュレーションについての誤差の少ない安定なシミュレーションや、回転翼機における汎用性の高いシミュレーション方式をご紹介しますとともに、実際のご利用の状況でのサポートについての一例を報告させていただいております。綿密なサポートについても当社の得意とするところであり、ますます当社製品をご利用いただき有効に役立てていただくための一助となれば幸いです。

さて、最後には若干毛色は変わりますが、当社駐車場システムの各種バリエーションのための開発結果3種のご紹介であります。環境への負荷と同時に運用コストを下げるタイプの駐車場システムについては、不正利用防止機能をきちんと組み込むこと、QRコードの適正な利用を可能とし、実用的、かつコストパフォーマンスの良いものに仕上がっております。また、一段上のサービスをお客様に提供しなければならないホテル等での駐車場システムにおいては、宿泊の情報と車両の番号を連携することにより、ご利用いただくお客様に、手数、負担なく入出場できるタイプの

物を用意させていただいております。さらに、多くの店舗のお客様に対して、一括で駐車場を提供される場合、駐車場利用のお客様に対してはサービスカウンター等での合計ではなく、自動的に各店舗のご利用の合計でのサービスを、店舗側では利用金額に正しく対応した負担を可能にすることで、駐車場利用客、各店舗ともどもにメリットのあるシステムも開発させていただいております。

簡便性を求められるお客様には簡便性を、高級サービスを求められるお客様には高度なものを、また公平性を要求されるお客様には公平性の担保を、お客様のご要求に応じたソリューションを求めて引き続き開発を進めさせていただきます。

当社の事業分野は多岐にわたり、それぞれにおいてのお客様のご要求も多岐にわたりますが、そのご要求に確実に対応し、適切なソリューションを提供させていただくべく、これからも各種開発を推進してまいります。

お客様におかれましては、本号をご高覧いただきますと共に、今後とも三菱プレジジョン株式会社のシステム、製品、ソリューションをご愛顧賜りますようお願い申し上げます。

超小型衛星が拓く新しい宇宙開発・利用

東京大学
大学院工学系研究科
航空宇宙工学専攻 教授

中須賀 真一



1 超小型衛星の意義と日本での歴史

近年、従来の数トン級衛星ではなく、100kg～500kgの「小型衛星」が世界各国の安全保障、防災、都市計画、自然環境・気象観測、農産物の生産管理、科学調査等の様々な分野に利用され、一つの宇宙産業になりつつある。さらに次世代の宇宙利用を担う超低コスト・短期開発の50kg程度以下の超小型衛星でも世界的な開発競争が始まっている。我が国でも、大学・高専が2002年ごろより16機の開発・打ち上げを行ってきており、重量や電力の制約の大きい超小型衛星で、超低コスト・短期開発とそこそこの性能・信頼性を両立させたことは宇宙業界に大きなインパクトを与えた。もちろん中型・大型衛星と同レベルの機能は持ち得ないが、同じコストでも多数機を開発・打ち上げできることで、同一地点の頻繁な観測を実施できたり、「しきい」が徹底的にさがることによって個人や企業・研究機関などによる「パーソナル衛星」「マイ衛星」が可能になったりすることにより、従来にない新しい衛星利用法や利用者が生まれる可能性を有している。

東京大学、東京工業大学が2003年に打ち上げに成功した、「CubeSat」と呼ばれる世界最小の10cm立方、1kgの衛星（図1は東大のXI-IV）を皮切りに、多くの大学で開発への挑戦が行われ、なかでも、東京大学のPRISM（図2左）は、8.5kgの衛星では世界最高レベルの30mの地上分解能の画像取得に成功、超小型衛星の地球観測分野への実利用に道を切り開いた。また、東京大学が国立天文台と共同で開発中の天文衛星Nano-JASMINE（図2右）は、姿勢安定度1秒角という大型衛星並みの姿勢制御能力により、位置天文（正確な3次元の星の位置と固有運動を求める研

究）分野で世界のトップサイエンスを目指している。世界においても、6.5mの地上分解能を実現したベルリン工科大学のTUBSATシリーズ、AIS、宇宙科学、リモートセンシングなどの分野で海外へ衛星や機器販売を行っているカナダ・トロント大学、Operationally Responsive Space (ORS)を合言葉に即応型・プラグインタイプの衛星の研究に莫大な軍関係予算がつき、多くの大学やベンチャーがしのぎを削るアメリカなど、超小型衛星は次世代の宇宙利用の切り札として世界中で研究開発競争が始まっている。

2 ほどよし信頼性工学

それらの小型・超小型衛星開発を進める大学・ベンチャーに共通した設計論は、「信頼性・性能」で最高水準を目指さないという「ほどよし」の発想である。図3のように、信頼性・性能で最高水準を目指すとは、あるところから急にコストや労力の爆発が起こることは多くの関係者が肌で感じている。大事なことは、どの点に信頼性・性能の設計点を設定するかであり、そこを誤ると、わずかの信頼性・性能向上のために莫大なコストをかけてしまうという陥穽に落ち入

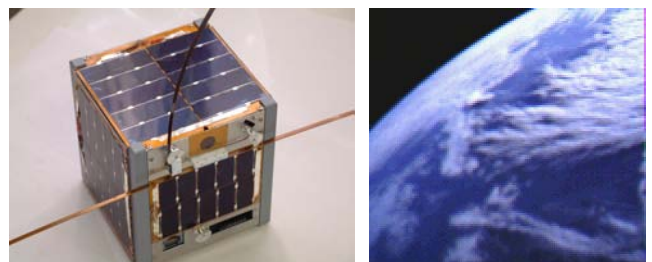


図1 東京大学 XI-IV とその取得した地球画像

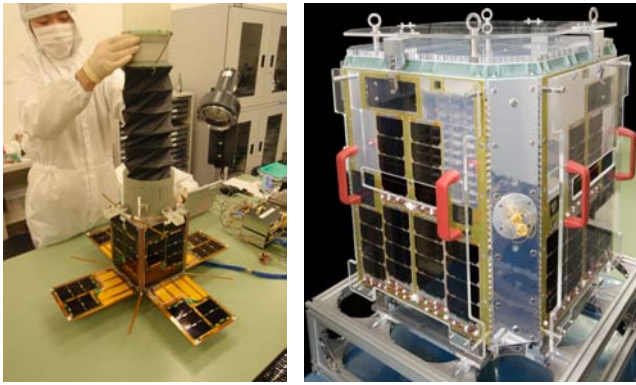


図2 PRISM および Nano-JASMINE のフライトモデル

る。これは宇宙だけでなく現在の日本の多くの分野で典型的に見られる、「過剰品質」症状である。我々は、小型・超小型で成功した大学・ベンチャーの技術者との意見交換などを通して、この暗黙知をある程度まで理論体系化し、客観的に設計点を導けるロジックを構築したいと考えている。

もう一つ大事なことは、「実現する信頼度 = 設計信頼度 × その設計通りに動作する確率」であるということ。この関係もないがしろにされやすいが、冗長系などを取り入れて「こってりしたシステム」を作れば設計信頼度は当然上がるが、システムが複雑化されたがゆえに増える設計・製造のミスのために、結局は信頼度が頭打ちになってコストばかり増えるということもよく起こっている。これらの関係もある程度モデル化し、「ほどよし」の設計指針に組み入れたと考えている。

3 世界一の超小型衛星大国を目指したプロジェクト開始

このような設計思想を具現化し、あわせて、超小型衛星の技術分野を整備して、日本の国内に世界一の超小型衛星の企画・立案・開発・利用開拓・販売の体制をつくるべく、筆者をリーダーとした内閣府の大きな予算を使ったプロジェクトが平成 21 年度にスタートした。世界と勝負をするには、まず技術的には、すべての要素技術（CPU、通信系、姿勢制御系、熱・構造系、展開機構、ミッション系など）で同サイズ比で世界一の製品を目指すこと、プロセス的には、これまでの衛星開発の発想を変え、モジュール化や地上試験の簡素化を含めた徹底的な工数削減を目指すこと、そして、体制的には、大学・企業がそれぞれの得意技術で参加できるサプライチェーンネットワークを含めた仕組みづくりを行うこと、そして、利用面では、従来の宇宙科学・リモセン分野での新しいユーザーの獲得と共に、教育・エンターテインメントなど新規分野での衛星利用の発掘を進めることなど、複数の分野で並行して取り組みを進めている。技術だけいくら良くしても決して産業化にはつながらない、これはこれまでの日本の宇宙開発から得た経験則である。

三菱プレジジョンには、特に姿勢制御関連機器の超小型化・低コスト化などにご興味があればぜひ進めていただき、世界と戦う我々に力をお貸しいただければと願う次第である。

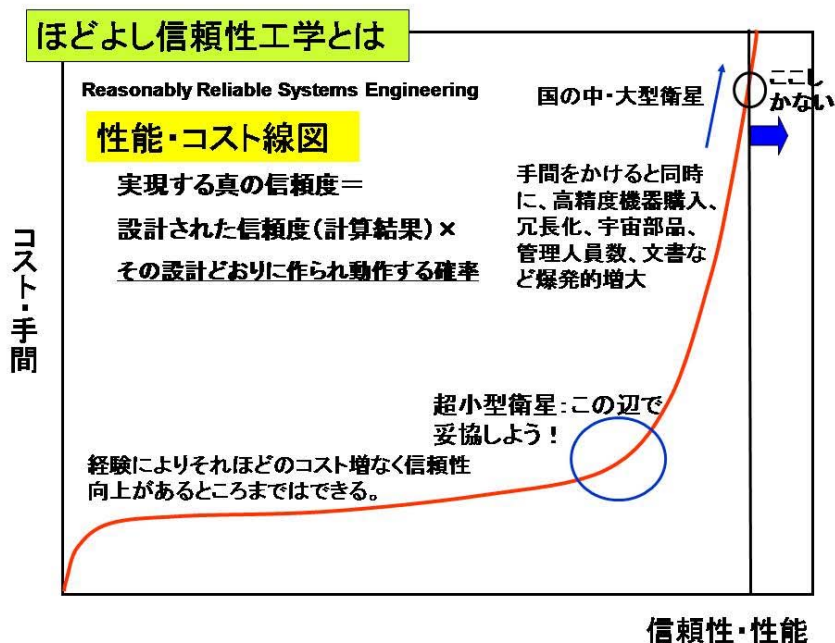


図3 ほどよし信頼性工学のイメージ図

<執筆者プロフィール>

中須賀 真一（なかすかしんいち）

1961年大阪生まれ。

東京大学 大学院工学系研究科 教授（航空宇宙工学専攻）

工学博士（東京大学）昭和63年

<学歴>

昭和58年 3月 東京大学 工学部 卒業

昭和63年 3月 東京大学 大学院工学系研究科
博士課程 修了

<職歴>

昭和63年 4月 日本アイ・ビー・エム東京基礎研究所 入社

平成 2年 4月 東京大学工学部航空学科講師

平成 5年 1月 東京大学大学院工学系研究科 助教授

平成16年12月 東京大学大学院工学系研究科教授（現職）

この間、アメリカ・メリーランド大学

客員研究員（平成8-9年）および

スタンフォード大学客員研究員（平成11年）

<研究活動>

- ・超小型人工衛星の設計・製作・運用に関する研究
- ・宇宙システムの知能化・自律化の研究
- ・革新的宇宙システムに関する研究
- ・宇宙機の航法誘導制御に関する研究
- ・日本航空宇宙学会，AIAA，SICE，IAA 等会員．
- ・日本学術会議連携会員．
- ・平成21年度より内閣府 FIRST プログラムによる
「ほどよし衛星」プロジェクトのリーダー．

高密度化モジュール方式による 小型宇宙用電子パッケージの開発

小川 智也, 田島 崇男, 棚橋 太地, 町田 忠広, 宮本 充

要旨： 宇宙機の小型化, 軽量化, 低コスト化に貢献することを目的とした小型宇宙用電子パッケージを開発した。本開発では, 宇宙機の一つである人工衛星用電子パッケージを対象とし, 人工衛星に必要な各種基本機能を機能モジュールとして統合すると共に, スペースの有効活用と高密度実装を特長とした高密度化モジュール方式を採用した。その結果, 同一機能を有する当社の宇宙用電子パッケージに対して, 体積比で 60 % の小型化を実現した。

1 まえがき

宇宙用電子パッケージは宇宙機(ロケット, 人工衛星, 宇宙ステーション等)に搭載され, 各宇宙機のバス系, ミッション系を含むサブシステムの一部となる機器である。かねてより宇宙用電子パッケージの小型化による打上質量の軽減は顧客要求として強く求められている。特に近年では小型衛星の需要増加に伴い, 小型軽量化開発の必要性が高まりつつある。ここでは, 人工衛星に用いる宇宙用電子パッケージをとりあげ, バス系の基本機能を担う各種モジュールを統合し, かつ艙装スペースを削除し小型・軽量化を図った結果を報告する。小型・軽量化は主として

- ① 内部スペースの有効活用
- ② 高密度実装による発熱対策

の二項目を考慮し構造解析, 熱解析, 質量解析を実施し, 組立時の作業性, メンテナンス性を視野に入れ, 宇宙用電子パッケージの小型・軽量化を図った。以下, 2 章では小型宇宙用電子パッケージの開発方針, 3 章では機器及びモジュールの構造設計, 4 章では宇宙用耐環境試験, 5 章では開発結果を述べる。

2 小型宇宙用電子パッケージの開発方針

小型宇宙用電子パッケージの開発では, 宇宙機であるロケット, 人工衛星, 宇宙ステーション等の中で, 人工衛星のバス系の基本機能を担うヒータ制御回路, パルプ駆動回路, パドル展開モータ駆動回路, 磁気トルカ駆動回路, 電力分配, モニタ・テレメトリ, 等の機能を統合した電子パッケージを開発する方針とした。これらの機能を統合することで, 人工衛星の小型化やシステムハーネス削減による軽量化, 低コスト化に貢献できる。

また, 人工衛星以外の宇宙機にも対応できるよう, 小型宇

宙用電子パッケージの基本構造を図 1 に示すとおりとした。図 1 に示す基本構造は, 各基本機能を有する機能モジュールを複数枚並べ, それらとサイドパネルをスタックボルトで締結する構造である。トップカバーは, 機能モジュール間のハーネスを保護する目的で, 設けてある。この構造は, 機能モジュールを組替え, 組合せが容易にできるため, 宇宙機の多様なニーズに合わせた, 電子パッケージに対応できる構造である。

2.1 開発目標

開発する機器の開発目標仕様を表 1 に示す。表 1 に示す環境条件, 動作温度は国内における宇宙機の耐環境性要求を包含するレベルに設定した。

表 1 に示す開発目標仕様を実現するために実施した方策検討を 2.2 項で述べる。さらに表 1 に示す環境条件, 質量に対する整合性を確認する目的で実施した設計検証(構造解析, 熱解析, 質量解析)について 3 項で述べる。

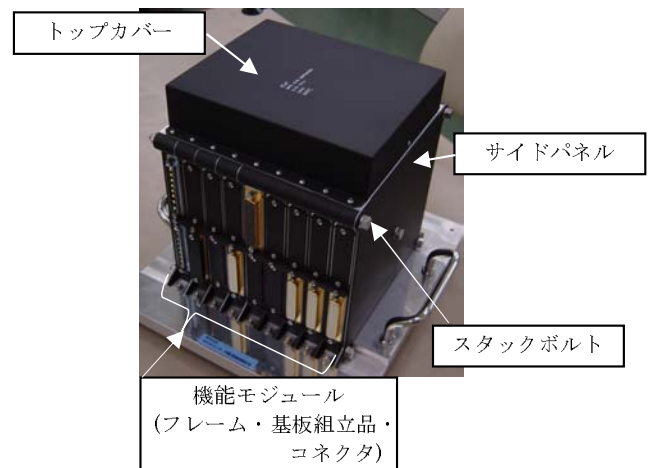


図 1 小型宇宙用電子パッケージの基本構造・ハンドリング用の治具を取付けた状態

表 1 開発目標仕様

| 項目 | 開発目標仕様 |
|---------|---|
| 外形寸法 | 234.5 (W) ×230 (L) ×234 (H) mm 以下 |
| 質量 | 10 kg 以下 |
| 取付面積 | 539.4 cm ² 以下 |
| 環境条件 | 正弦波：196 m/s ² ランダム：193 m/s ² rms 衝撃：9800 m/s ² SRS |
| 動作温度 | -30℃～+60℃, 真空 |
| 機能モジュール | a) 1次電圧分配モジュール b) 2次電圧供給モジュール c) 2次電圧分配モジュール d) ヒータ電力供給モジュール e) バルブ&スラスト駆動モジュール f) 太陽電池パドル展開モジュール g) 磁気トルカ駆動モジュール h) シリアル通信モジュール |

表 2 機能モジュールの構造方式検討結果

| 項目 | 構造方式 | |
|---------------|---|-------------------|
| 機能モジュール イメージ図 |  | |
| フレーム | 材料厚さ (mm) | アルミニウム合金 22 |
| 基板組立品 | 電気部品高さ (mm) | 10 |
| | 部品面許容部品高さ (mm) | 10 |
| コネクタ | はんだ面許容部品高さ (mm) | 10 |
| | 種類 | D-sub ライトアングルコネクタ |
| 機能モジュール | 最大高さ (mm) | 18 |
| | 容積 (mm ³) | 7.37E+05 |
| | 最大有効実装率 (%) | 95.0 |

2.2 小型化実現のための対策

(1) 内部スペースの有効活用

小型化を実現するために機能モジュールの構造方式について、方策検討を実施した。機能モジュールの構造方式検討結果を表 2 に示す。表 2 に示すとおり、コネクタ最大高さは 18mm であり、機能モジュールのフレーム厚さ 22mm に対して、81.8% (= 18/22*100) を占める。一方、基板組立品における電気部品高さは 10mm であり、機能モジュールのフレーム厚さ 22mm に対して、45.5% (= 10/22*100) を占める。

以上より、フレーム厚さはコネクタの最大高さに強く依存しており、必ずしも電気部品高さに対して最適ではなく、デッドスペースが存在していることがわかる。

そこで、機能モジュールの基板組立品における部品面、はんだ面の両面に対して、許容部品高さを 10mm と設定し、互いに隣り合う機能モジュール複数枚を組み合わせることで、デッドスペースを有効活用する対策とした。デッドスペースの有効活用イメージ図を図 2 に示す。図 2 に示すとおり、はんだ面の部品許容高さを 10mm と設定することで、デッドスペースを有効に活用できていることがわかる。この対策により、機能モジュール 1 枚の容積に対して、電気部品の最大実装率を 95.0% まで向上することができる。

なお、この対策はフレームから電気部品が突出し、突出した電気部品の保護が必要となることから、機能モジュールの組立作業性を阻害する要因となる。これを回避するため、3.4 項で述べる治具を製作することで、阻害要因を排除し、組立時の作業性を維持することとした。

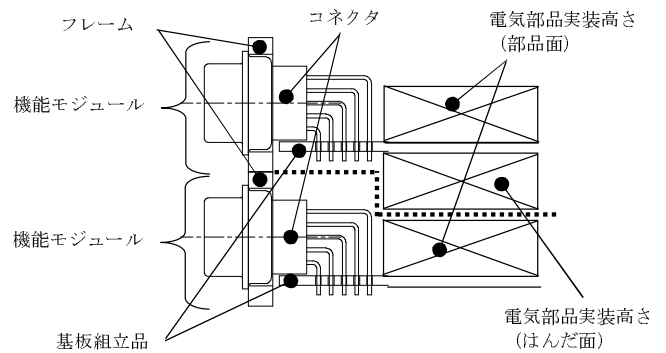


図 2 デッドスペースの有効活用イメージ図

(2) 高密度実装による発熱対策の検討結果

基板組立品に実装する電気部品はリード部品から、表面実装部品への置換を進めた。表面実装部品化は基板組立品内の電気部品を高密度に実装することができるため、小型化を実現するための有効な手段である。

一方、電気部品の実装を高密度化することで、基板組立品の単位面積あたりの発生熱量は増加する傾向にある。そこで、基板組立品の設計において、内層パターンの厚みを増すことで熱伝導効率の向上を図った。特に発熱が大きい電気部品については排熱用のパターンを設置し、さらに熱伝導効率を向上させた。本対策は剛性の向上にもつながり、結果的に耐振性の向上にも寄与する。

表 3 基板の応力及び変位解析結果

| 基板組立品 | 応力 | | | 変位 | |
|----------|------------|------------|-------------------------------------|------------|------------|
| | 最大応力 (MPa) | 許容応力 (MPa) | 余裕安全率 ^{※1} (MS) (設計係数:1.5) | 最大変位量 (mm) | 許容変位量 (mm) |
| PSU | 35.09 | 88.2 | 0.67 \geq 0 | 0.230 | 0.266 |
| SRL | 37.49 | 88.2 | 0.56 \geq 0 | 0.181 | 0.266 |
| VDE | 46.39 | 88.2 | 0.26 \geq 0 | 0.172 | 0.266 |
| SAP/MTQE | 52.76 | 88.2 | 0.11 \geq 0 | 0.197 | 0.266 |
| HTR | 45.10 | 88.2 | 0.30 \geq 0 | 0.168 | 0.266 |

※1: 余裕安全率 (MS) = {許容応力 / (最大応力 × 設計係数)} - 1

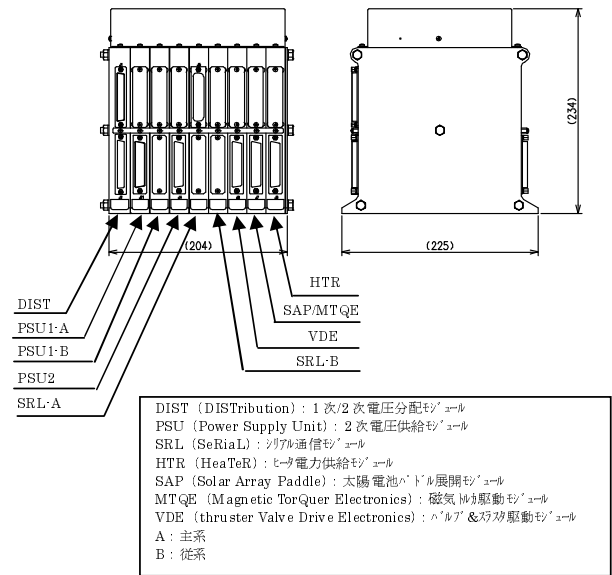


図 3 開発する機器の外形図

3 機器及び機能モジュールの構造設計

小型化実現のための方策をもとに開発する機器に対して、構造解析，熱解析，質量解析を実施し，開発目標仕様を満足することを設計解析により確認した。また，併せて組立時の作業性，メンテナンス性等の検討についても実施した。開発する機器の外形図を図 3 に示す。図 3 に示すとおり，開発目標仕様の基本機能

- a) 1 次電圧分配モジュール
- b) 2 次電圧供給モジュール
- c) 2 次電圧分配モジュール
- d) ヒータ電力供給モジュール
- e) バルブ&スラスト駆動モジュール
- f) 太陽電池パドル展開モジュール
- g) 磁気トルカ駆動モジュール
- h) シリアル通信モジュール

を組み込んだ状態で外形寸法が，204 (W) × 225 (L) × 234 (H) mm であり，開発目標仕様の 234.5 (W) × 230 (L) × 234 (H) mm 以下であることを確認した。

3.1 構造解析結果

開発する機器の各機能モジュールに実装される，各基板組立品の応力，変位を算出した。解析は，Pro/E Mechanical を使用した。応力及び変位解析結果を表 3 に示す。表 3 に示すとおり，各基板組立品の応力，変位が許容応力，許容変位量以下であり，機械環境耐性を有することを確認した。

また，開発する機器と宇宙機の構造インタフェースとなる項目（取付ボルト，インサート）について強度計算を実施した。取付ボルト及びインサートの強度解析結果を表 4 に示す。表 4 に示すとおり，取付ボルト及びインサートに発生する荷重は強度を満足しており，選定した取付ボルトサイズが妥当であることを確認した。

表 4 取付ボルト及びインサートの強度解析結果

| 取付ボルトサイズ | 構造インタフェース | 方向 | 初期締付軸力 (N) | 発生荷重 (N) | 強度 (N) | 余裕安全率 (設計係数:1.5) |
|------------|-----------|----|------------|----------|--------|------------------|
| No.8-32UNC | 取付ボルト | 面内 | 2453 | 723 | 5001 | 0.41 \geq 0 |
| | | 面外 | 2453 | 500 | 5001 | 0.56 \geq 0 |
| | インサート | 面内 | — | 373 | 686 | 0.22 \geq 0 |
| | | 面外 | — | 221 | 392 | 0.18 \geq 0 |

・取付ボルト
余裕安全率 (MS) = {取付ボルトの強度 / (初期締付軸力 + 発生荷重 × 設計係数)} - 1
・インサート
余裕安全率 (MS) = {インサートの強度 / (初期締付軸力 + 発生荷重 × 設計係数)} - 1

表 5 熱解析結果

| 基板組立品 | 電気部品 | 型名 | 発熱量 (W) | 予測ジャンクション温度 (°C) | デレーティング温度 (°C) |
|-------|--------|--------|---------|------------------|----------------|
| PSU | PWM-IC | UC1825 | 0.3 | 91.2 | 100 |
| | FET | 2N7269 | 4.0 | 103.2 | 125 |

3.2 熱解析結果

開発する機器の熱解析を実施した。解析条件は取付面温度: +60，発熱条件: 定常発熱における最大モードとした。解析は Thermal Desktop/SINDA を使用した。熱解析結果を表 5 に示す。表 5 に示すとおり，基板組立品に実装する部品がデレーティング温度以下であり，高密度実装による発熱対策が有効であることを確認した。

3.3 質量解析結果

開発する機器の質量解析を実施した。解析は Pro/E を使用した。質量解析結果を表 6 に示す。表 6 に示すとおり，開発する機器の質量は 6.84kg (ノミナル値) であり，開発目標仕様 10.0kg 以下を満足することを確認した。

表 6 質量解析結果

| 項目 | 結果 | 備考 |
|-------|---------------------------------|-------------------|
| 開発目標値 | 10.0kg 以下 | |
| 解析結果 | 6.84 kg (ノミナル値) 7.53kg (最大値) | 最大値＝ ノミナル値+10% |

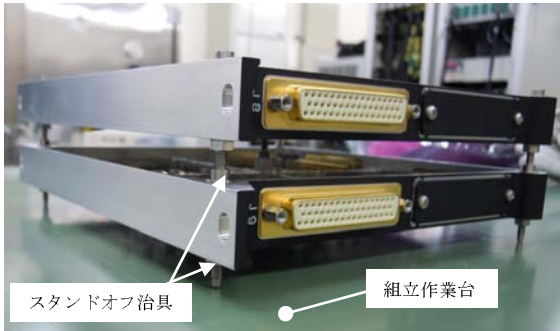


図 4 専用スタンドオフ治具:写真は収納効率化のため、機能モジュールを 2 段積みとした状態である

3.4 組立時の作業性、メンテナンス性

宇宙機の設計では、トランスコイル、トランジスタ等の大型部品は、耐振性や排熱性を考慮し、フレームに直接固定する実装方式が一般的である。その場合、基板組立品完成後に改めてフレームに固定した部品と基板組立品間の配線作業が発生し、組立時の作業性を阻害する要因となる。また、コネクタについても同様で、コネクタと基板組立品との配線作業が発生し、組立時の作業性を阻害することとなる。

これに対し、開発した機器においては 2.2(2) 項に記載したように、高密度実装による発熱対策により、耐振性と熱伝導効率の向上が実現されたため、大型部品をフレーム上でなく基板組立品上に実装することが可能となり、結果として基板組立後の配線作業の課題が解決されている。また、コネクタはライトアングルタイプのコネクタを採用することで、コネクタと基板組立品とのワイヤ配線作業を無くし、組立作業性の向上を実現した。

さらに組立作業中のメンテナンス性向上を目的とし、フレームから突出する電気部品を保護するための専用スタンドオフ治具を製作した。専用スタンドオフ治具を図 4 に示す。図 4 に示すとおり、この治具を使用することで、フレームから突出する電気部品を組立作業台からオフセットし、組立作業中の電気部品保護を実現した。

4 宇宙用耐環境試験

開発した機器の耐環境性評価を目的として、振動試験(正弦波、ランダム)、衝撃試験、熱真空試験、電磁適合性試験を実施した。振動試験については、人工衛星搭載機器の剛性要求である 120Hz 以上を確認する目的で、モーダルサーベイによる固有振動数計測を行った。さらに、熱真空試験中は 3.2 項で述べた熱解析結果の妥当性を確認する目的で、基板組立品に実装している電気部品のケース温度測定を行った。評価試験の結果、機器の機能及び性能は評価基準を満たし、宇宙機搭載に対する環境適合性を確認することができた。

4.1 振動試験

打上時に発生する音響振動への耐性を評価する目的で正弦波振動試験、ランダム振動試験を実施した。試験条件は表 7 に示す数値を適用し、特にランダム振動の印加時間については、今後のフライト品製作に向けた累積疲労損傷率参照モデルとしての実績を蓄積する目的で、開発試験等で通常要求される時間 180 秒の 1.5 倍である 270 秒(180 秒 × 1.5 = 270 秒)で評価を行った。また、モーダルサーベイによる固有振動数計測を行い、人工衛星搭載機器の剛性要求 120Hz 以上の剛性を有することを確認した。振動試験実施前後の機器の機能、性能、及び印加中にモニタした特性値に異常はなく、振動環境に対しての耐性を確認した。

4.2 衝撃試験

衛星分離時に発生する衝撃への耐性を評価する目的で衝撃試験を実施した。試験条件は表 7 中に示す数値を適用した。衝撃試験実施前後の機器の機能、性能、及び印加中にモニタした特性値に異常はなく、衝撃環境に対しての耐性を確認した。

4.3 熱真空試験

軌道上で遭遇する真空熱サイクル環境への耐性を評価する目的で熱真空試験を実施した。試験条件は表 7 に示す条件を適用した。熱真空試験実施前後の機器の機能、性能及び印加中の特性値モニタに異常はなく、熱真空環境に対しての耐性を確認した。また、熱環境に対する電気部品の評価基準となるディレーティング温度に対する適合性確認を目的として、部品ケース温度の計測を実施した。表 8 に熱解析結果と実測結果の比較を示す。表 8 に示すとおり、電気部品の実測ジャンクション温度はディレーティング温度以下であり、評価基準を満たすことを確認した。

表 7 開発品試験条件と評価試験結果

| 実施項目 | 試験条件 | 評価結果 |
|---------|--|---|
| 振動試験 | <p>【正弦波振動】(3軸共通) 周波数範囲 (Hz) 加速度 (m/s²)_{0-p} 5 ~ 27.96 12.7mmDA 27.96 ~100 196 掃引速度: 2oct/min</p> <p>【ランダム振動】(3軸共通) 周波数範囲 (Hz) 加速度密度 ((m/s²)²/Hz) 20 ~ 70 +6dB/oct 70 ~ 270 48.0 270 ~ 400 -6dB/oct 400 ~1000 22.1 1000 ~2000 -8dB/oct 実効値: 193 m/s² rms, 印加時間: 270 秒</p> | <p>振動印加前後の機能/性能および印加中の各種モニタに異常は無く、振動環境に対する耐性を確認した。またモーダルサーベイ(共振点探査)を実施した結果、一次固有振動数は、236.5Hzとなり搭載機器への剛性要求(120Hz以上)を満足することと、事前解析結果: 240Hzの妥当性を確認することができた。</p> |
| 衝撃試験 | <p>周波数範囲 (Hz) 加速度 (m/s²) SRS(Q=10) 100~1000 +8dB/oct 1000~3000 9800 印加回数: 各軸正負方向 2 回</p> | <p>衝撃印加前後の機能/性能および印加中の各種モニタに異常は無く、衝撃環境に対する耐性を確認した。</p> |
| 熱真空試験 | <p>【圧力】: 0.0013Pa 以下 【温度】: 高温非動作温度: +65°C, 高温動作温度: +60°C 低温非動作温度: -35°C, 低温動作温度: -30°C 【サイクル数】: 8 サイクル</p> | <p>試験前後の機能/性能および環境印加中の各種モニタに異常は無く、熱真空環境での耐性を確認した。電子部品に関し、ケース温度を計測した結果、ディレーティング基準を下回ることを確認するとともに事前解析結果の妥当性を確認した。表 8 に解析結果と実測値の比較を示す。</p> |
| 電磁適合性試験 | <p>放射干渉感度: RS02/RS03/RS11 放射干渉雑音: RE01/RE02 伝導干渉感度: CS01/CS02/CS06 伝導干渉雑音: CE01/CE03/CE11/CE13/CE14</p> | <p>RS/CSの各項目とも規定のノイズ印加レベルに対し、各種モニタに異常は無く、耐性を有することを確認した。RE/CEの各項目とも規定のノイズレベル以下であることを確認した。</p> |

表 8 熱解析結果と実測結果の比較

| 基板組立品 | 電気部品 | 型名 | 発熱量 (W) | 予測(解析)ジャンクション温度(°C) | 実測ジャンクション温度(°C)*1 | ディレーティング温度(°C) |
|-------|--------|--------|---------|---------------------|-------------------|----------------|
| PSU | PWM-IC | UC1825 | 0.3 | 91.2 | 94.9 | 100 |
| | FET | 2N7269 | 4.0 | 103.2 | 93.2 | 125 |

*1: 実測ジャンクション温度は、ケース温度計測結果にケース~ジャンクション間の熱抵抗値×発生熱量を加算し算出した。

表 9 開発目標仕様と開発結果

| 項目 | 開発目標仕様 | 開発結果 (実績) |
|--------|---|---|
| 外形寸法 | 234.5 (W) ×230 (L) ×234 mm (H) 以下 | 201.6 (W) ×225 (L) ×234 (H) |
| 質量 | 10 kg 以下 | 6.5 kg |
| 取付面積 | 539.4 cm ² 以下 | 459.0 cm ² |
| 環境条件 | 正弦波: 196 m/s ² ランダム: 193 m/s ² rms 衝撃: 9800 m/s ² SRS | 正弦波: 196 m/s ² ランダム: 193 m/s ² rms 衝撃: 9800 m/s ² SRS |
| 動作温度範囲 | -30°C ~ +60°C, 真空 | -30°C ~ +60°C, 真空 |
| 消費電力 | 55 W 以下 | 32 W |
| 固有振動数 | 120Hz 以上 | 236.5 Hz |
| バス電圧条件 | 22~33 V | 22~33 V |
| 基本機能 | a) 1次電圧分配機能 b) 2次電圧供給機能 c) 2次電圧分配機能 d) ヒータ電力供給機能 e) バルブ&スラスタ駆動機能 f) 太陽電池パドル展開機能 g) 磁気トルカ駆動機能 h) SRL 通信機能 | a) 1次電圧分配機能 b) 2次電圧供給機能 c) 2次電圧分配機能 d) ヒータ電力供給機能 e) バルブ&スラスタ駆動機能 f) 太陽電池パドル展開機能 g) 磁気トルカ駆動機能 h) SRL 通信機能 |

4.4 電磁適合性試験

機器からの放射、及び伝導雑音レベルの計測と周辺からの放射、伝導感度の計測を実施した。その結果、発せられるノイズレベルが人工衛星搭載機器へ要求されるレベル以下であること、放射、伝導ノイズに対して感受性が無いことを確認することができ、表 7 に示す各項目につき、人工衛星搭載機器へ要求されるレベルへの適合性を確認した。

5 開発結果

設定した開発目標仕様と開発結果の比較を表 9 に示す。小型化、及び耐環境性につき目標仕様を達成することができた。

6 むすび

開発した機器が、小型化実現の対策が有効であることを確認した。同機能を有する当社製品に比べて、体積比で60%の小型化設計を実現した。また、開発した機器の宇宙用耐環境性を評価する目的として、振動試験(正弦波,ランダム), 衝撃試験, 熱真空試験, 電磁適合性試験を実施し, 耐性を有することを確認した。今後, 本開発で得られた成果を各宇宙機に搭載する当社の宇宙用電子パッケージの製品化に反映し, 顧客の要望に応えていく所存である。

[執筆者紹介]



小川 智也 略歴

1991年入社, 衛星搭載機器及び宇宙ステーション搭載機器の機構設計を経て, 姿勢制御用機器の機構設計に従事。



田島 崇男 略歴

2005年入社, ロケット搭載機器及び衛星搭載機器, HTV搭載機器の機構設計を経て, 姿勢制御用機器及び慣性センサの機構設計に従事。現在, 宇宙機器部機械技術課



棚橋 太地 略歴

2002年入社, シミュレータの機構設計を経て, ロケット搭載機器及び衛星搭載機器, 宇宙ステーション搭載機器の機構設計に従事。現在, 技術部機械技術課



町田 忠広 略歴

1991年入社, 衛星搭載機器及びロケット搭載機器, HTV搭載機器の電気設計に従事。現在, 宇宙機器部宇宙電子機器一課



宮本 充 略歴

2010年入社, 衛星搭載機器の電気設計に従事。現在, 宇宙機器部宇宙電子機器一課

人工衛星搭載用TDG - IRUの小型軽量化

平田 晋吾, 小島 正人, 大地 一嘉

要旨： 人工衛星に姿勢制御系のセンサとして搭載され、衛星の角速度を高精度に検出する機器であるチューンドドライジャイロ (TDG) を用いた慣性基準装置 (IRU) の小型軽量化に関する報告である。電気回路部へチップ部品等の小型部品を、筐体材用に軽量材料を採用することにより小型軽量化を図った。結果、現在のIRU に比べ筐体容積を約 30% 削減でき、また、質量を約 32% 削減し 7kg にまで軽量化できる目処が得られた。これまでに設計を完了し、今後認定モデルにより設計、製造の妥当性評価を実施し、2011 年 9 月までに開発を完了する計画である。

1 まえがき

人工衛星の姿勢制御系では、慣性空間に対する衛星の姿勢を検知するため、ジャイロを内蔵した慣性基準装置 (IRU: Inertial Reference Unit) が使われている。慣性基準装置に内蔵されるジャイロとして、リングレーザジャイロ (RLG: Ring Laser Gyro) や光ファイバジャイロ (FOG: Fiber Optic Gyro) といった光学式ジャイロ、また近年は半球型共振ジャイロ (HRG: Hemispherical Resonant Gyro) が使われることもあるが、従来から使われている機械式ジャイロが、寿命、実績、価格の点から、現在でも多く使われており、今後もこの状況が続くと考えられる。当社は、1980 年代に機械式ジャイロである TDG (Tuned Dry Gyro) を使用した IRU を宇宙開発事業団 (現宇宙航空研究開発機構) 殿と共同で開発した。開発した IRU は、それ以降の国内で開発されるほとんどの衛星に搭載されている実績を持っている。1980 年代に開発した当初の IRU は約 16kg の質量があったが、その後小型軽量化を進め、現在は約 10kg の IRU を製造、販売している。近年小型の衛星が着目され、搭載機器も小型化の要求が高まってきている。これに応えるために、更なる小型軽量の IRU を目指して、2010 年度より小型 IRU の開発を行っている。これまでに設計を完了し、現在試作モデルの製造を行っている。小型化に当たっては、小型のチップ部品等の小型の部品を多く使用して基板面積を削減する、軽量材料の採用等の対策を採った。

本稿では、2 章で TDG を用いた IRU の構造と動作を、3 章で IRU の機能・構成を、3 章で小型軽量化設計の具体的な内容について述べている。

2 TDG を用いた IRU の構造と動作

2.1 TDG

TDG は、1 個でジャイロロータ回転軸に垂直な直交 2 軸まわりの角速度成分を検出できる特性を持つ機械式ジャイロ

ロである。図 1 に TDG の基本構成図を示す [1]。この図において、ジャイロロータを支持し、かつシャフトに接続されているフレクチャヒンジとジンバルが TDG の最も特徴的な部品である。TDG は、このジンバルの動的挙動により発生する負のばね効果と、ジャイロロータを元の位置に戻そうとするフレクチャによる正のばね効果を釣り合わせて、ジャイロロータがフリーロータとして機能するように設計している。他の構成部品としては、ピックアップ、モータステータ、及びトルカコイルを有するジャイロハウジングと、前述したフレクチャヒンジ、ジンバルおよびモータロータを含む回転部より構成される。TDG は、ジャイロロータが空間内で回転するケースに追従していくようピックアップ (ケースに対するジャイロロータの相対変位角を検出する素子) からの信号をトルカ (ジャイロロータにトルクを加え、ケースに対するジャイロロータの相対変位角を変化させる素子) に与え拘束するフィードバックループ (リバランスループ) を構成する。この結果、ジャイロロータを拘束するのに必要なトルカ電流は、TDG に入力される角速度に比例することになる。ベアリングは適切な予圧設定と、潤滑剤の量の管理等の品質管理を行うことにより、軌道上で

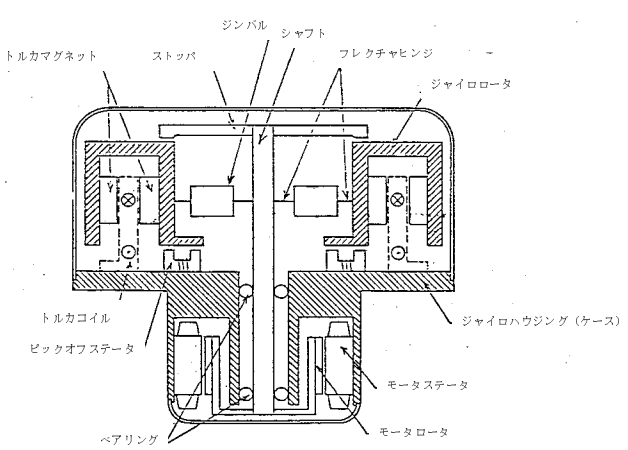


図 1 TDG の基本構成図

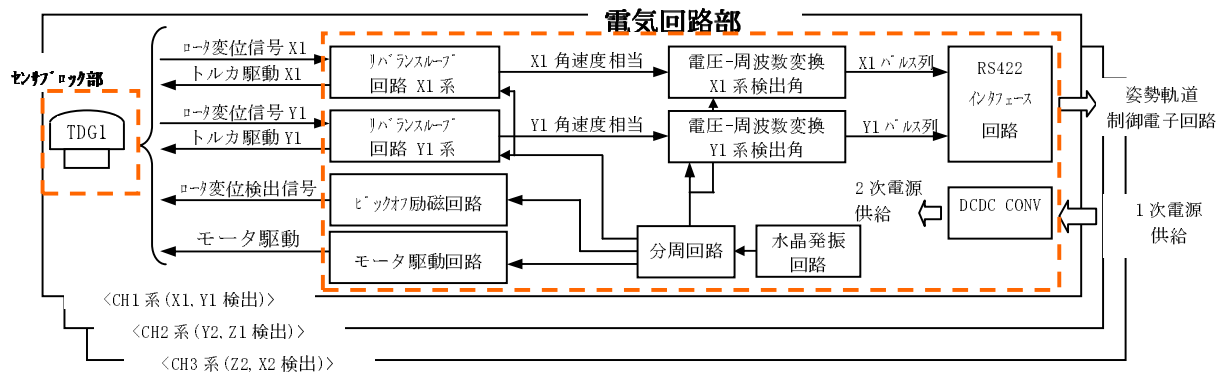


図2 IRU 機能ブロック図

20年以上の連続回転が可能な寿命を有している。

TDGは、ジャイロロータがフリーロータとして機能するため、1個で2軸の角速度の計測が可能である。この特長は、TDGを3個直交配置することにより、仮に3個のうち1個が故障したとしても、残りの2個で直交3軸の角速度計測を継続できる2 out of 3の冗長構成を可能にする。

2.2 IRUの構成と機能

図2にIRUの機能ブロック図を示す[2]。IRUは、大きく分けてTDGの搭載されるセンサブロック部と電気回路部から構成される。センサブロック部は、CH1～CH3の計3個のTDGを直交配置に搭載している。

また、センサブロック部は、TDGを衛星打上時に印加される機械環境から保護するために、緩衝器を介して筐体に固定している。緩衝器は、振動が印加された際にセンサブロック部の回転モードの振動を生じないように考慮して配置している。電気回路部は以下の要素より構成される。

① モータ駆動回路

TDGのモータを駆動するための方形波を出力する

② ピックオフ励磁回路

TDGのピックアップを励磁するための正弦波信号を出力する。

③ リバランスループ回路

TDGのピックアップで検出したジャイロロータの角度変位信号を基に、トルカに電流を流すことによりジャイロロータをジャイロケースに追従していくように制御する。トルカに流す電流がTDGへの入力角速度に比例するため、電流を電圧に変換することにより入力角速度に比例した電圧値を得ることができる。

④ 電圧-周波数変換回路(V/Fコンバータ)

リバランスループ回路で得られた、入力角速度に比例した電圧を、電圧に比例した周波数を持つパルス信号に変換する。このパルス信号は、その数を積分することによりその間の角度変化を知ることができるため、角度増分パルス信号と呼ばれる。

⑤ RS422 インタフェース回路

電圧-周波数変換回路で得られたパルス信号をRS422のインタフェース信号に変換して出力する。

⑥ 水晶発振回路、分周回路

IRU内部で使用するクロックを生成する。

⑦ DCDC CONV (DC/DCコンバータ)

衛星システムから供給される1次電源を受け、IRU内部で使用する2次電源を生成する。

2章で述べたように、TDGは2 out of 3の冗長系が本来の性質として含まれているため、TDG1個と電気回路1式をまとめて1チャンネルとして、これを3チャンネル搭載することにより、電気回路まで含めて独立した3チャンネルで構成される2 out of 3のシステムを実現している。

3 小型軽量化設計

3.1 設計目標

衛星搭載機器は、信頼性の観点から軌道上の動作実績が重要視される。小型化にあたってはこれまでの実績を最大限に活かすことを考慮し、TDGおよびセンサブロックは設計変更をせずに現在の設計をそのまま使用することとした。電気回路部も回路設計は変更せずに使用する部品の変更のみとすることとした。また、機能・性能は現在のIRUから変更しないものとした。表1に小型IRUの目標仕様を示す。

現在のIRUから30%減の7kgの質量目標を設定した。

3.2 設計

4.1項に示した設計目標を達成するため、以下に示す小型軽量化設計を行った。

(1) モジュール配置

本小型IRU外観を図3に示す。電気回路基板が、センサブロック部の底面積と同程度の面積で実現できれば、センサブロック実装部分の上に電気回路を配置することで全体に小型化できるため、電気回路基板の小型化を前提として

表 1 小型 IRU 目標仕様

| 項目 | 現在の IRU | 小型 IRU 目標仕様 |
|---------|-----------------------|------------------------|
| ジャイロ | TDG | TDG |
| 計測範囲 | ±4deg/s | ±4deg/s |
| 出力角度分解能 | 0.05 秒角 | 0.05 秒角 |
| バイアス安定性 | 0.006 deg/h(3σ) | 0.006 deg/h(3σ) |
| 質量 | 10kg | 7.0kg 以下 |
| 寸法 | 364×257×120mm | 182×257×200mm 以下 |
| 容積 | 11,226cm ³ | 9355cm ³ 以下 |
| 取付面積 | 935cm ² | 468cm ² 以下 |
| 消費電力 | 36W | 36W 以下 |
| 寿命 | 15 年以上 | 15 年以上 |

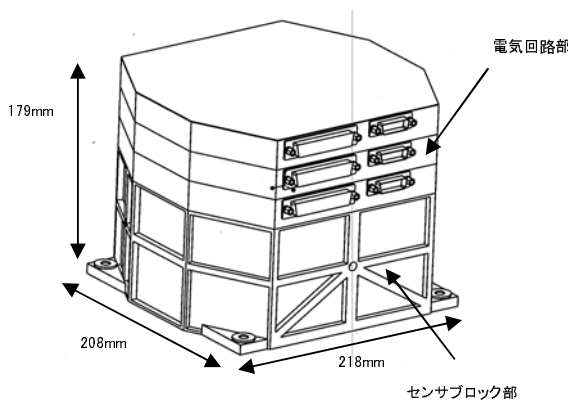


図 3 小型 IRU 外観

図 3 のような配置とした。

(2) 回路基板

本小型 IRU では、DC/DC コンバータとその他の回路を同一の基板に実装することにより、一つのチャンネルあたりの基板枚数は 1 枚とした。

基板の小型化にはチップ部品を多数採用し、実装密度を上げた。チップ部品の採用にあたっては、衛星搭載機器として部品の実装方法を評価するために、評価基板の温度サイクル試験等の信頼性評価試験等により信頼性の確認された部品、実装方法を採用している。

また、リバランスループ回路、電圧-周波数変換回路では、電圧ノイズを数 100nV 程度以下に抑える必要があるため、DC/DC コンバータとその他の回路を 1 枚の基板に実装するに当たっては、DC/DC コンバータで発生するスイッチングノイズがリバランスループ回路等に混入して性能を劣化させることの無いように、基板パターンの工夫をしている。基板枚数の削減は、基板間の接続のための端子等も削減する効果があり、IRU 全体の小型軽量化に大きく貢献している。

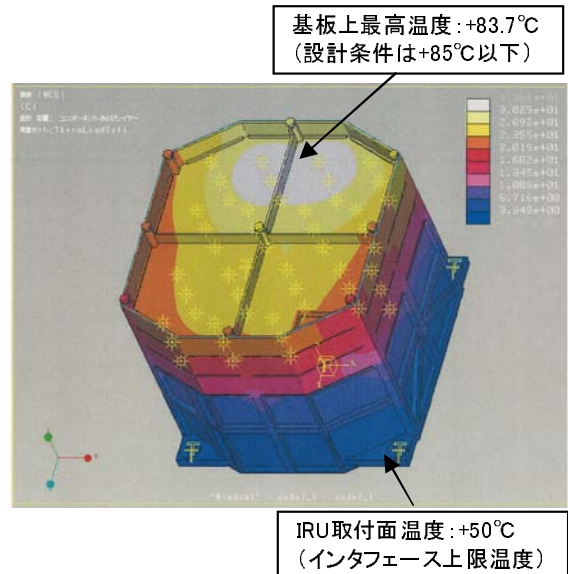


図 4 熱解析結果の例

(3) 筐体

IRU の筐体（ケース）の小型軽量化のために以下①～③に示す対策を採った。

① IRU 取付面（底面）面積の削減

電気基板の面積の削減により IRU の取付面積の削減が可能となった。

② マグネシウム合金の採用

筐体の軽量化のため、比重の小さい材料としてマグネシウム合金を使用する。現在の IRU ではコストを重視し、筐体材料としてアルミニウム合金を使用していた。マグネシウム合金はアルミニウム合金に比べて高価であるが、筐体の小型化及び加工部品点数の削減により、コスト上の問題も解決した。マグネシウム合金を使用することによりアルミニウム合金を使ったときと比べ、約 0.44kg の質量削減となる。

③ 筐体厚さ

筐体を薄肉化し、剛性確保のために必要な部分のみリブを持たせる構造とすることにより、軽量化を図った。小型 IRU では筐体の上に電気回路が置かれる構造となっており、電気回路部で発生した熱は筐体を介して取付面に伝わるため、筐体の薄肉化による排熱への影響を評価しておく必要がある。電気回路から IRU 取付面までの熱数学モデルを作成し、熱解析を実施した。図 4 に熱解析結果の例を示す。図 4 に示すようにこの結果、基板上的最高温度も設計条件を満たしていることを確認した。

表2 小型 IRU 目標仕様と設計結果

| 項目 | 現在の IRU | 小型 IRU 目標仕様 | 小型 IRU 設計結果 |
|---------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| ジャイロ | TDG | TDG | TDG |
| 計測範囲 | ±4deg/s | ±4deg/s | ±4deg/s |
| 出力角度分解能 | 0.05 秒角 | 0.05 秒角 | 0.05 秒角 |
| バイアス安定性 | 0.006 deg/h(3σ) | 0.006 deg/h(3σ) | 0.006 deg/h(3σ) |
| 質量 | 10kg | 7.0kg 以下 | 6.9kg |
| 寸法 | 364×257×120mm | 182×257×200mm 以下 | 208×218×179mm |
| 取付面積 | 935cm ² | 468cm ² 以下 | 453cm ² |
| 消費電力 | 36W | 36W | 36W |
| 寿命 | 15 年 | 15 年 | 15 年 |

(4) 電気回路フレーム，トップカバー

DC/DC コンバータとその他の電気回路を同一基板上に実装することができたため，DC/DC コンバータとその他の電気回路のフレームが一体化できた．トップカバーについても，全体形状を小型化できたため小型化できた．更にフレーム，トップカバーともに筐体と同様にマグネシウム合金を採用することにより，アルミニウム合金を採用したときと比べ約 0.17kg の質量削減となった．

(5) その他

DC/DC コンバータとその他の電気回路を一体化できたこと及び電気基板面積削減により，モジュール間の配線材，接着剤及びコーティング材等の質量も削減することができた．

3.3 設計結果

4.2 項に示した設計を実施した結果，設計目標の小型軽量化を達成する見込が得られた．表 2 に小型 IRU 目標仕様と設計結果を示す．小型軽量化の削減目標とした体積，取付面積，質量において，設計目標を達成した．

4 むすび

本稿では，豊富な軌道上実績を基に 2010 年度から開発を開始した小型軽量の TDG-IRU の設計結果について述べた．小型化として質量 7kg 以下を目標として設定し，チップ部品の多用による電気基板の小型化及び軽量材料による筐体設計等の小型化軽量化設計を実施した．現在の IRU に比べ電気基板面積を約 30% 削減し，電気基板枚数を 1/4 にでき，それにより筐体容積を約 30% 削減できた．また，筐体材用に軽量材料を採用することにより軽量化を図り，現在の IRU に比べ，質量約 32% 削減し，目標とする体積 935cm³ 以下，質量 7kg 以下を達成する目処が得られた．内部冗長を有する高精度 IRU で 7kg 以下のものは他に例が無く，今後の衛星において，小型の衛星に限らず広く使用されることが期待される．

本小型 IRU は，宇宙航空研究開発機構殿の支援を受け，2011 年 9 月までに認定モデルによる評価試験を完了する予

定である．認定試験では，性能試験の他に環境試験として，一般の衛星搭載機器に要求される振動試験（正弦波振動，ランダム波振動），衝撃試験，熱真空試験，EMC 試験を実施し，設計，製造の妥当性を確認する計画である．

謝 辞

TDG IRU の開発当初から多大なご協力を頂いている，宇宙研究開発機構殿はじめ国内宇宙開発機関殿及び衛星システムメーカー殿に深く感謝致します．

参考文献

- [1] 里誠，大谷崇，川井洋志，平田晋吾，小島正人，高口広樹，“高信頼性 TDG-IRU の研究開発結果，” 第 51 回宇宙科学技術連合講演会講演，No.1F14，2007.
- [2] 小島正人，高口広樹，“将来型 IRU の研究，” 三菱プレシジョン技報，Vol.2，pp.34-36，Jun.2006.

【執筆者紹介】



平田 晋吾 略歴

1988 年入社，主に人工衛星搭載機器の開発に従事．現在，宇宙機器部衛星制御システム課



小島 正人 略歴

1989 年入社，主に人工衛星搭載機器の開発に従事．現在，宇宙機器部衛星制御システム課



大地 一嘉 略歴

1989 年入社，ロケット及び人工衛星搭載機器の開発に従事．現在，宇宙機器部機械技術課

小型高速回転ホイール「5～10Nms タイプ」の開発

谷口 典史，田島 崇男

要旨： 中大型衛星向け角運動量 10～30Nms 級及び 30～80Nms 級の 2 つのタイプのリアクションホイールの開発実績を基に，質量 1000kg 未満の小型衛星向けの小型高速回転ホイール（角運動量 5～10Nms 級）を JAXA 研究開発本部殿と開発中である．ベアリングの小型化，モータ専用 IC の適用，実装技術の改善，柔構造の採用により，58% の小型化（「タイプ M」との容積比），42% の機械環境耐性向上（NASA 標準レベルとの実効値比），及びコストダウンを実現した．一部開始した寿命試験を継続し，小型衛星への搭載を目指す．

1 まえがき

リアクションホイールは人工衛星に搭載され，回転を加減速することにより人工衛星の姿勢を制御するアクチュエータの一種である．三菱プレジジョンでは，これまで質量 1000kg 以上の中大型衛星向けリアクションホイールには「タイプ M（角運動量 10～30Nms 級）」及び「タイプ L（角運動量 30～80Nms 級）」を供給することができた．しかし，質量 1000kg 未満の小型衛星向けの小型ホイール（角運動量 5～10Nms 級）を有しておらず，衛星システムにおいては海外品を使用せざるを得ない状況にあった．海外品を使用するにあたっては，必要な技術・品質情報を入手することが難しい場合が多いことから，高信頼性かつユーザ要求に柔軟に対応可能な国産小型ホイールが望まれていた．このため，小型高速回転ホイール「5～10Nms タイプ」（以下「タイプ S」と呼ぶ）の開発に着手した．

小型高速回転ホイール「タイプ S」は，これまでに開発した高速回転ホイール「タイプ M」「タイプ L」の開発成果を基に，更なる小型軽量化，機械環境耐性の向上，コストダウンを目標に開発したものである．小型軽量化に対しては，ベアリングの小型化及び，モータ専用 IC の適用により部品実装面積を縮小することにより対応した．機械環境耐性の向上に対しては，構造を柔構造化することにより対応した．コストダウンに対しては，モータ専用 IC の適用によるディスクリット部品の削減，実装技術の改善による工数削減により対応した．

以下，2 章では「タイプ S」の開発目標を，3 章では設計方針を，4 章では開発結果を述べる．

2 「タイプ S」の開発目標

図 1 に高速回転シリーズの中での「タイプ S」の位置付けを示す．「タイプ S」は小型衛星向けのため，主要性能である角運動量は 5～10Nms，出力トルクは 0.05Nm を開発

目標としている．なお，図 1 の「タイプ L-A」[1]，「タイプ M-A」は，通常の「タイプ L」「タイプ M」に比べ出力トルク，機械環境耐性を向上し軽量化を図ったものである．

表 1 に「タイプ S」の開発目標性能を示す．比較対象の海外製ホイールは，現在，多くの小型衛星に搭載されているホイールである．海外製ホイールに対し質量的にはやや不利となるが，あえて角運動量，制御トルクを大きめに設定し，衛星システム設計の拡張性に配慮すると共に，機械環境耐性を高く設定し，ユーザ側が使い易いホイールとしている．又，このクラスのホイールは厳しい価格競争に晒されるが，高信頼性を維持しつつコストダウンを目指した．

3 「タイプ S」の設計方針

(1) 小型ベアリングの適用

2008 年度より JAXA 殿による「タイプ S」用ベアリングの開発が開始された．「タイプ S」の角運動量は最大 10Nms であり，最大 30Nms の「タイプ M」，最大 80Nms の「タイプ L」に対してロータマスが軽量化される．ロータマスが軽量化されたことによって，機械環境印加時（振動試験時）におけるベアリングへの荷重も小さくなるため，ベアリングの小型化が可能となった．図 2(a) に「タイプ M」「タイプ L」等で使用している従来ベアリング，図 2(b) に「タイ

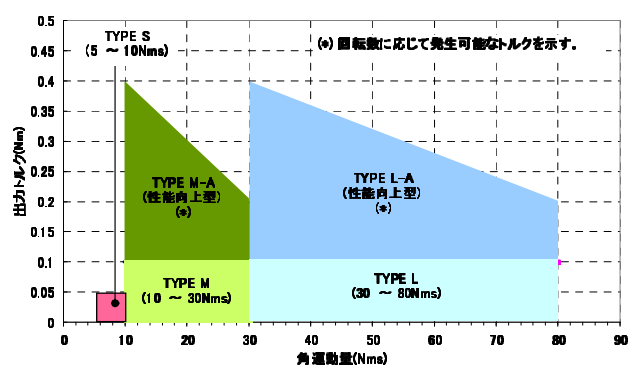


図 1 「タイプ S」の位置付け



(a) 「タイプ M」用ベアリング (b) 「タイプ S」用ベアリング

図 2 従来型ベアリングとの比較

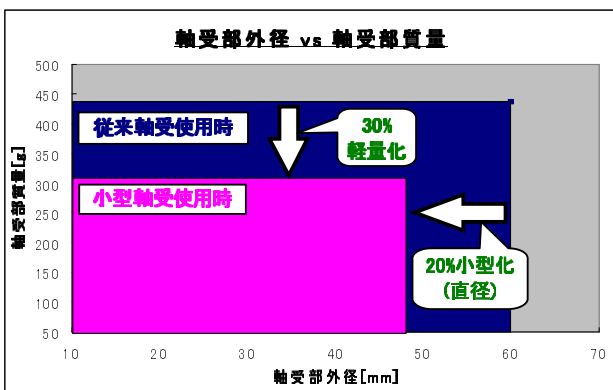


図 3 軸受部外形と軸受部質量の関係

「タイプ S」で使用した小型ベアリングの外観を示す。

軸受部外形と軸受部質量の関係を図 3 に示す。小型ベアリングを使用することにより、軸受け部（ベアリングホルダ）としては外形で 20% の小型化、質量で 30% の軽量化を図ることが可能となった。また、小型ベアリングでは製造プロセスの整備・見直しを行い、従来ベアリングに対してコストダウンを実現している。

| 項目 | 性能・諸元 | |
|--------------------|--|--|
| | 「タイプ S」 | 海外製ホイール |
| 角運動量 | ~10 Nms @5000 rpm | ~4 Nms @5100 rpm |
| 制御トルク | 0.05 Nms以上 | 0.02 Nms以上 |
| 外形・寸法 | φ222×98 mm (RW/WDE 一体構造) ^{※a, b} | RW ^{※a} φ205×64mm WDE ^{※b} 190×154×32mm |
| 質量 | 3.9 kg (5 Nms) | 3.46 kg (4 Nms) |
| 機械環境耐性 (ランダム振動) | 20 Grms | 14.1 Grms |
| 設計寿命 | 軌道上10年以上 | 軌道上10年以上 |

※a: RW: Reaction Wheel, 角運動量を変化させるフライホイール
 ※b: WDE: Wheel Drive Electronics, ホイール駆動回路

表 1 「タイプ S」開発目標性能

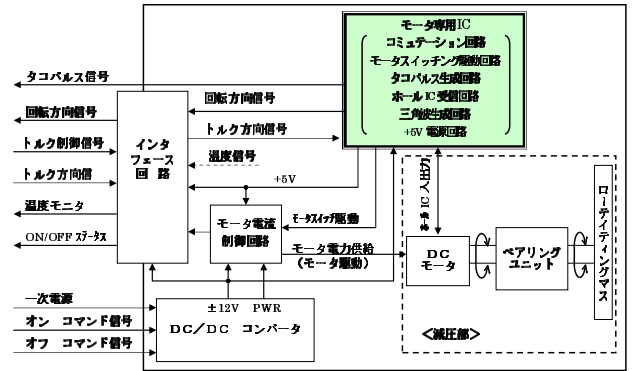


図 4 「タイプ S」の機能ブロック概要とモータ専用 IC の機能

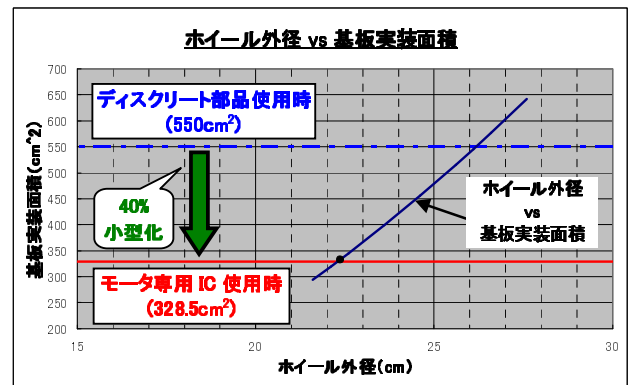


図 5 モータ専用 IC による小型化

(2) モータ専用 IC の適用

・機能・性能

モータ専用 IC は、モータスイッチングロジック回路、モータスイッチングドライバ回路、タコパルス生成回路、ホール IC 受信回路、三角波生成回路、+5V 電源回路を含む市販のモノリシック IC である。図 4 に「タイプ S」の機能ブロック概要とモータ専用 IC の機能を示す。

図 5 に示すとおり、本 IC の使用によりディスクリート部品で本 IC の機能を構築した場合と比較し、ホイールドライバ回路^{*1}の基板面積を 40% 小型化することが可能となった。また、部品点数の削減による組立工数の低減から、コストダウンを達成することが可能となった。2009 年度に当該 IC を使用した WDE を試作し、「タイプ M」「タイプ L」等従来の WDE と同等の機能・性能が達成できることを評価した。また、宇宙用を想定し、特に「耐放射線性」と「品質」については次に示す対策を採った。

・耐放射線性

2009 年度に本 IC に対する放射線試験を実施し、1000Gy の耐性を確認したことから、宇宙機器への適用が可能である。(Gy: 放射線のエネルギーの総量を表す単位)

*1 WDE: Reaction Wheel Wheel drive Electronics, ホイール駆動回路

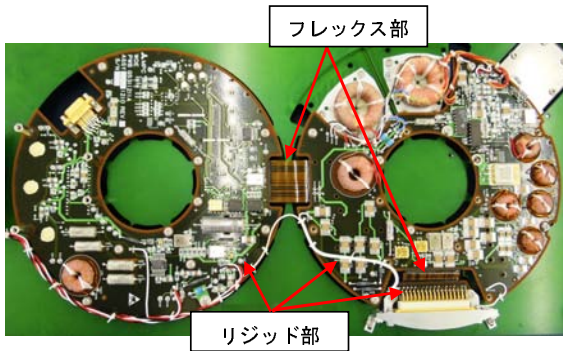


図6 フレックス・リジッド基板を用いて実装した WDE 基板

・品質

本 IC は、宇宙用品質グレード品が市販されていなかった。よって、2010 年度より JAXA 殿契約にて本 IC をアップグレード (宇宙用 QML-V クラス) するため、IC メーカーにて QML 認定を取得中である。

(3) 実装技術

「タイプ S」のハードウェア設計において特筆すべき点として、「組み立て易さを考慮した実装技術」を挙げることができる。「タイプ S」では、フレックス・リジッド配線板を採用したことにより、2 枚の基板を同時にリフローはんだ付けすることが可能となった。また、組立作業において手間を要する電線による配線に至っては、基板間及びコネクタ間の配線が一切不要となり、大幅なコストダウンを達成することが可能となった。図 6 に、フレックス・リジッド基板を用いて実装した WDE 基板を示す。「タイプ S」用のフレックス・リジッド基板は、ドーナツ型の 2 枚のリジッド部をフレックス部にて一体化したと共に、D-サブ取付け部 (リジッド部) とドーナツ基板間もフレックス部で接続した。なお、本基板を含めた WDE には、「タイプ S」の限られたスペース内に DC/DC コンバータ及びモータ駆動回路用のトランス、インダクタ、タンタルキャパシタ、MOS FET 等大型部品を実装している。

3.1 機械環境耐性

図 7 に「タイプ S」の機械環境条件の開発目標値を示す。図 7 は横軸に周波数、縦軸に単位周波数あたりの加速度の分散値である PSD (パワースペクトル密度) を示す。「タイプ S」の機械環境条件の開発目標値は、NASA 標準振動レベルの 2 倍 (PSD 比較) の環境に対して耐性があり、海外製ホイールよりも機械環境耐性を上回っている。よって、殆どの小型衛星の機械環境条件に対応可能な設計である。

(1) 構造解析

2009 年度に、「タイプ M」「タイプ L」等で確立した構造解析技術をベースに「タイプ S」の機械環境 (振動) に対する構造解析を実施した。構造解析実施内容を以下に示す。

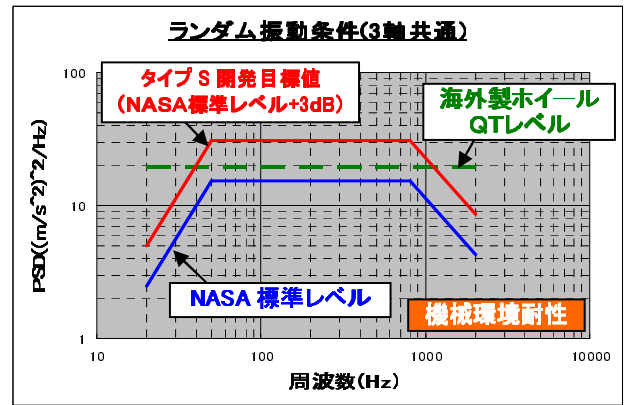


図7 「タイプ S」機械環境条件の開発目標値と NASA 標準レベル

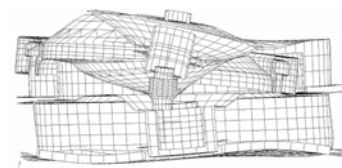


図8 構造解析の一例 モード図

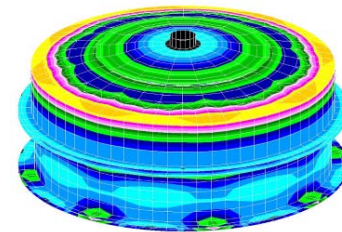


図9 構造解析の一例 応力コンター図

- ・固有値解析
 - ・静荷重解析
 - ・機械環境印加時におけるベアリング負加重解析
 - ・機械環境印加時におけるベアリング部ミスアライメント
- NASTRAN (構造解析シミュレータ) による構造解析の一例として図 8 にモード図 (固有振動数における振幅形状を表す図)、図 9 に応力コンター図 (応力の大きさを色の違いで識別した図) を示す。図 8、図 9 に示す構造解析を実施した結果、開発目標値の機械環境条件において、耐性があることを確認した。

(2) 機械構造モデル評価

「タイプ S」の機械構造モデル (電気回路を有さないモデル) を製作し、以下の目的で評価試験を実施した。

- ・機械環境印加による減衰機構の振動応答特性の把握
- ・機械環境印加後のベアリング圧痕調査によるベアリング限界荷重の評価
- ・減衰機構の振動応答特性を模擬した構造数学モデルの構築

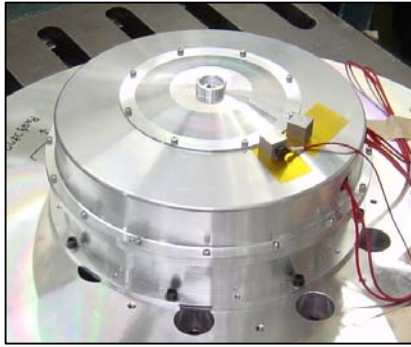


図 10 機械構造モデルによる振動試験

| 項目 | 性能・諸元 | |
|--------------------|---------------------------|--|
| | 開発目標値 | 開発試験結果 |
| 角運動量 | 10 Nms ±1.5% @5000 rpm | 9.98 Nms @5000 rpm |
| 制御トルク | 0.05 Nm以上 | 0.076 Nm |
| 外形・寸法 | φ222×98 mm/ミナカ (一体構造) | φ222×97.8 mm (一体構造) |
| 質量 | 5.3 kg以下 (10 Nms) | 5.23 kg (10 Nms) |
| 機械環境耐性 (ランダム振動) | 20 Grms | 2011年度実施 (構造モデルでは、3章に 示すとおり評価済み) |

表 2 開発目標値と開発試験結果の対比



図 11 「タイプS(エンジニアリングモデル)」 外観写真

図 10 に機械構造モデルによる振動試験の試験状況写真を示す。各部位に加速度センサを貼り、振動応答特性を取得した。評価の結果、有効なデータを取得することができた。また、構造解析の妥当性を確認することができた。

4 開発結果

表 2 に開発目標値と開発試験結果の対比を示す。一部評価前ではあるが、開発試験結果は開発目標値を十分満足しており、設計・製造の妥当性を確認することができた。図 11 に「タイプS」の外観写真を示す。

5 むすび

「タイプM」「タイプL」の技術を踏襲して「タイプS」の開発を行った結果、既開発品からベアリングの小型化、モー

タ専用 IC の適用、実装技術の改善、柔構造化により、小型軽量化、機械環境耐性の向上、コストダウンを実現することができた。将来的には当該技術を「タイプS」のみならず、当社製他ホイールに対しても反映していきたい。ベアリングの寿命評価については、2010 年度より、長期連続回転試験（寿命試験）を一部開始している。2011 年度からは、更にハードウェア数を追加し、ホイール形態 4 台による評価を開始する予定である。なお、今後の計画を以下に示す。

- ・2011 年度初旬 エンジニアリングモデル評価
- ・2011 年度 認定モデル製作、認定試験
- ・2012 年度 フライト品供給可能

謝辞

「タイプS」開発の機会をいただきました JAXA 研究開発本部殿各位及び日頃よりご協力ご支援をいただきました関係者各位に深く感謝すると共に、残りの開発を完遂していく所存です。

参考文献

- [1] 谷口典史, 田邊和久, 梶田直希, 田島崇男, “高速回転ホイールの性能向上,” 三菱プレジジョン技報, Vol.4, pp.43-48, May.2009.

[執筆者紹介]



谷口 典史 略歴

1989 年入社、衛星搭載機器の電気設計及び品質管理を経て、リアクションホイール設計に従事。現在、宇宙制御システム課



田島 崇男 略歴

2005 年入社、ロケット搭載機器及び衛星搭載機器、HTV 搭載機器の機構設計を経て、姿勢制御用機器及び慣性センサの機構設計に従事。現在、宇宙機器部機械技術課

ドライビングシミュレータ向け 視界発生用データベース生成システムの開発

林 隆伯, 川上 隆行, 中野 泰子

要旨： 地図データや標高データをもとにプロシージャル技術を用いて、道路、建物、地形の3次元形状を自動で生成するシステムを開発した。現実の道路設計における道路中心線の利用や道路断面のマッチングによる道路3次元形状の自動生成、さらに地図データと建物ライブラリのマッチングによる建物3次元形状の自動生成技術を実現した。これにより、広範囲の視界発生用データベースを短時間で柔軟に構築もしくは変更することが可能となり、ドライビングシミュレータの有効性を高めることができる。

1 まえがき

ドライビングシミュレータ(以下DS^{*1})は安全上の問題から実車では困難な実験を行えること、また同一の走行条件を再現できることなどの有用性から、公的研究機関、自動車メーカー、大学などで広く用いられている[1, 2]。近年は、揺れや角加速度を模擬する動揺装置、ターンテーブルに加え、並進装置により加速減速時の模擬を忠実に再現する事例[3]、全方位に模擬視界を発生できる事例[4]が報告されている。これらハードウェアの進化に伴い、視界発生用データベース(以下DB^{*2})においても現実と同じく広域な領域の模擬が求められている。しかし、モデリングソフトを使用した一般的な作成方法では品質を維持したまま一定期間に作成できる領域には限界がある。そこで人間がDB作成の全てを担当するのではなく、コンピュータだけで作成する、もしくはコンピュータの支援によって作成効率を上げることが注目されており、これらの技術は総称してプロシージャル技術と呼ばれる[5]。DSに必要なDBでは、道路、建物、地形といった地物の3次元形状の模擬が必要であり、これらをプロシージャル技術により作成している例としては[6, 7, 8, 9, 10]が挙げられる。しかし、道路中心線(道路線形)の精度が不十分である、車線増減が表現できない、建物モデルの種類に限られる、ポリゴン数が膨大になりリアルタイムに適さない、などといった問題点があり、DS用DBとして使用するには不十分である。

そこで我々は独自に、実際の道路設計手法に基づいた道路中心線の利用、異なる道路断面同士のマッチングによる車線増減部や交差点の3次元形状自動生成、地図データと既存建物ライブラリのマッチングによる建物の3次元形状自動生成などを実装した、DS用DB生成システム(以下

DBGS^{*3})を開発した。以下、2章においてDBGSによる道路、建物、地形の3次元形状の作成について述べる。

2 データベース生成システム

図1に、開発したDBGSによるDB作成フローを示す。まず地図や標高データ、航空写真といったリソースデータがDBGSにロードされる。そしてリソースデータをもとに視界発生用DBである道路DB、建物DB、地形DBが並列的に構築される。道路DBにおいては、まず道路の中心線となる道路線形の作成を行う。次に道路の3次元形状を作成する際の断面形状データとなる道路断面テンプレートの作成を行う。最後にコンピュータが自動で道路線形に沿って道路断面テンプレートを引き伸ばすように繰り返し配置し、道路DBとして出力する。

建物DBにおいては、地図データに含まれる建物フットプリント(建物の外枠を表す平面上の閉直線群)をもとに、自動で形状を認識、建物種別や高さなどを推定し、3次元化を行い建物DBとして出力する。地形DBにおいては、自動で標高データをユーザーが指定した分解能になるよう補間し、メッシュ状ポリゴンの作成とテクスチャの貼り付けを行い地形DBとして出力する。このようにしてDBGSによって作成された視界発生用DBの表示例を図2に示す。地図データに基づいて作成するため、道路、建物、地形の3次元形状データを違和感なく組み合わせることができる。次節以降において、図1中にあるDBGS内の各項目について述べる。

2.1 道路線形の作成手法と適用事例

文献[6]などの道路の3次元形状生成手法では、現実の道路設計とは異なる道路線形(道路の中心線)を利用しているため、車両走行をシミュレートするDS用DBとして

*1 DS: Driving Simulator 自動車運転模擬装置

*2 DB: DataBase データベース

*3 DBGS: DataBase Generation System データベース生成システム

は適切でない。本 DBGS では実際の道路設計と同じく、道路の 3 次元的位置およびロール方向の傾きを直線、円弧（曲率が一定の曲線）、緩和曲線（曲率が滑らかに変化する曲線）、放物線で表す設計手法を採用しているため、実在の道路の模擬に適している。図 3 に DBGS で作成した道路線形の一例を示す。図中の各線が上方からみた道路の中心線を表しており、要素別（直線 / 円弧 / 緩和曲線）に色分けしている。また青い点は制御点であり、マウス操作による編集機能を備えている。

2.2 道路断面テンプレートの作成手法と適用事例

(1) 従来手法における課題

前節において述べた道路線形をもとに道路の 3 次元形状を作成するには、基本的な断面形状を定義したポリゴン群が必要となり、ここではそのポリゴン群を道路断面テンプレートと呼ぶ。一般的に道路の 3 次元形状を作成するときは、文献 [6] などのようにモデリングソフトによって道路断面テンプレートを道路線形に沿って押し出すことで作成す

るが、異なる道路断面テンプレート間をスムーズに接続するには、ユーザーが一つ一つのポリゴン形状を指定する必要があり手間がかかっていた。

(2) 本 DBGS での手法

そこで、本 DBGS では道路断面テンプレートが歩道や車線といった区域ごとに異なるポリゴン群で構成されていることに注目し、各ポリゴンデータに歩道や車線など自身が何の区域に所属するかというタグ情報を埋め込むようにした。詳細は第 2.3 節で述べるが、これにより、異なる道路断面テンプレートを接続しようとしたとき、互いのポリゴンのタグ情報を参照し、可能な限り同じタグ同士を接続するようにいわゆるパターンマッチングを行うことで自動的にスムーズな形状変化を形成させることが可能となる。図 4 に道路断面テンプレートの一例を示す。黒い矢印で示した位置の各ポリゴンデータ中に、頂点座標やテクスチャ座標などに加え、歩道や車線といったタグ情報が埋め込まれている。

ここで DBGS が道路断面テンプレートをロードするとき、ポリゴンデータのまま保持するのは冗長なデータがあるため、道路断面テンプレートの各ポリゴンを形成するエッジ群のうち前方のエッジ群に情報を集約してしまい、3 次元情報から 2 次元情報へと変換しておく。図 5 に 2 次元データに変換した道路断面テンプレートの一例を示す。道路断面テンプレートの各エッジは 2 つの頂点 $Pt[e][0]$ 、 $Pt[e][1]$ ($0 \leq e < \text{エッジ数}$) で構成されており、頂点座標、テクスチャ座標などを保持している。

2.3 道路 3 次元形状の自動生成手法と適用事例

(1) 道路線形の直線近似

道路の 3 次元形状データは、3 角形または 4 角形のポリゴンを最小構成要素としている。しかし、道路の中心線である道路線形には曲線が存在するため、道路線形に沿って 3 次元形状データを作成するには、まず道路線形を直線群に変換する必要がある。一般的なモデリングソフトでは、変換時に分割数または分割間隔を指定して変換するが、その場合は直線に近い曲線であっても細かく分割されるため、

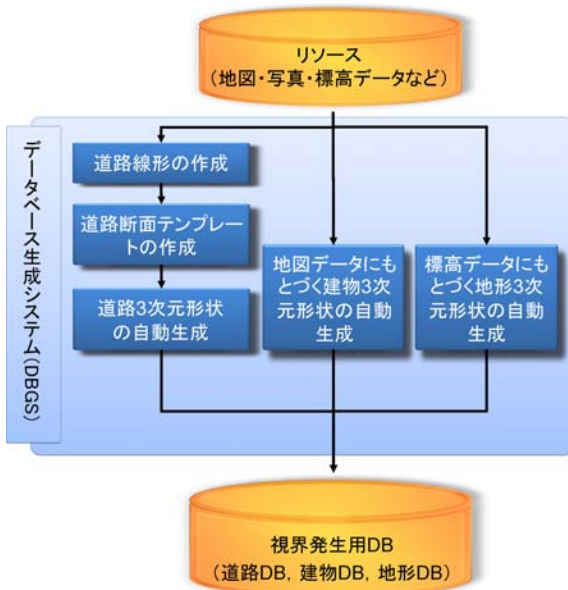


図 1 DBGS による DB 作成フロー



図 2 DBGS で作成した視界発生用 DB の表示例

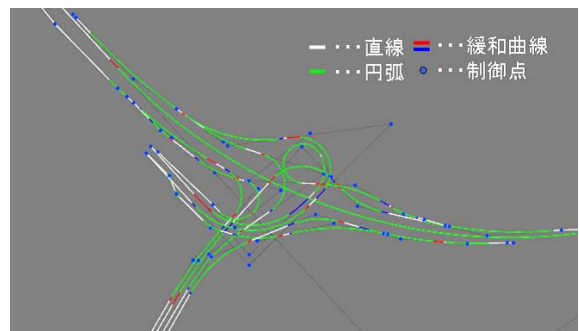


図 3 DBGS で作成した道路線形の一例

描画時の負荷が大きくなって無駄である。

そこで本 DBGS では、道路線形の各要素（直線、円弧、緩和曲線など）と近似直線間の最大誤差 f を変換パラメータとし、また曲線半径 R によって相対的な分割密度が変化するようにした。この f を変化させることで異なる詳細度をもつ近似直線群が得られ、誤差を変換パラメータとして直接指定するためユーザーにとっても変換精度を把握しやすい。また曲線半径 R を考慮することで大きい曲線半径の場合は粗い分割数に、逆に小さい場合は細かい分割数となり、描画品質を落とさずに最適なポリゴン数で詳細度のコントロールが可能で近似直線群が得られる。このようにパラメータ f をユーザー指定パラメータとしたとき、道路線形の各要素を近似直線にするための分割数 n は式 (1) で定義される。

$$\text{分割数 } n = \frac{L}{2R \cdot \text{acos}(1 - f/R)} \quad (1)$$

ここで、

L : 要素の長さ

R : 要素の最小曲線半径

f : 要素と近似直線間の最大距離

である。なお、要素が直線のとき分割数 n は 1、緩和曲線のときは簡易のため始点と終点のどちらか小さいほうの曲線半径を R としている。

(2) 基本的な道路 3 次元形状の生成手法

前項により得られた道路線形の近似直線群をなす各頂点 P_c および図 5 に示した道路断面テンプレート中のあるエッジ e を形成する頂点 $P_t[e][0]$, $P_t[e][1]$ から、道路 3 次元形状を構成するポリゴンの頂点 P_s を式 (2) に基づいて算出

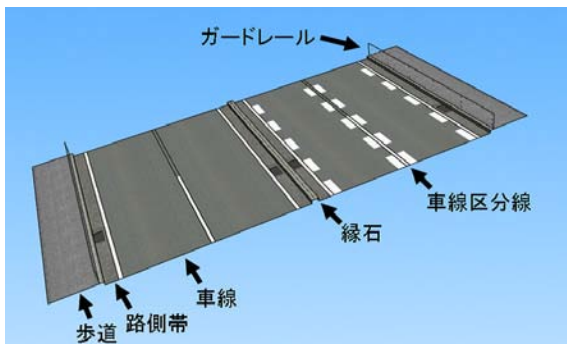


図 4 道路断面テンプレートの一例

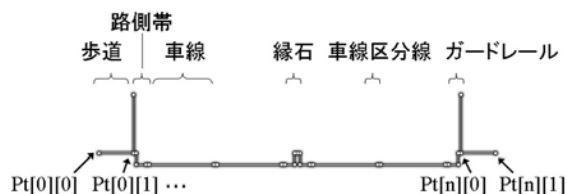


図 5 2次元データに変換した道路断面テンプレートの一例

する。また式 (2) の概念図を図 6 に示す。

$$\begin{cases} P_s[e][0][k].x = P_c[k].x + P_t[e][0] \cdot \sin \theta[k] \\ P_s[e][0][k].y = P_c[k].y + P_t[e][0] \cdot \cos \theta[k] \\ P_s[e][0][k+1].x = P_c[k+1].x + P_t[e][0] \cdot \sin \theta[k+1] \\ P_s[e][0][k+1].y = P_c[k+1].y + P_t[e][0] \cdot \cos \theta[k+1] \\ P_s[e][1][k].x = P_c[k].x + P_t[e][1] \cdot \sin \theta[k] \\ P_s[e][1][k].y = P_c[k].y + P_t[e][1] \cdot \cos \theta[k] \\ P_s[e][1][k+1].x = P_c[k+1].x + P_t[e][1] \cdot \sin \theta[k+1] \\ P_s[e][1][k+1].y = P_c[k+1].y + P_t[e][1] \cdot \cos \theta[k+1] \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $0 \leq e <$ 道路断面テンプレートのエッジ数、 $0 \leq k <$ 近似直線群をなす頂点数、 θ は近似直線の各頂点に対して設定された角度であり、始点および終点では始点・終点を含む線分の法線角度、その他の点では前後の線分の法線角度の中間値をとるものとする。またポリゴン形成後、テクスチャ座標を線分の長さだけスケールし、かつ前後のポリゴン間でテクスチャ座標を引き継ぐことで、連続したテクスチャ表示を実現している。以上の手法を適用し、基本的な道路 3 次元形状生成の一例を図 7 に示す。(a) が直線近似する前の道路線形を表している。(b) が (a) を 2.3(1) 項の手法で直線近似した状態であり、さらに 2.3(2) 項の手法でポリゴンを生成し (c) となる。最後に前後のポリゴン間でテクスチャ座標の引き継ぎを行い、(d) となる。

(3) 道路断面テンプレート変化部の 3 次元形状自動生成

道路車線数の増減や幅が変化する箇所では、異なる道路断面テンプレート同士を接続する必要がある。既に 2.2 節で述べたように本 DBGS では道路断面テンプレートの各ポリゴンにタグ情報を持たせることで、自動で接続処理を行う機能を実現した。具体的には、2 つの道路断面テンプレートの各タグ情報を比較し、一番タグ情報が一致した数が多いときの組み合わせを採用する。そしてそれらタグが一致したポリゴンのみを、ユーザーが指定した区間において 2.3(2) 項の手法で新たなポリゴン群を作成するが、この

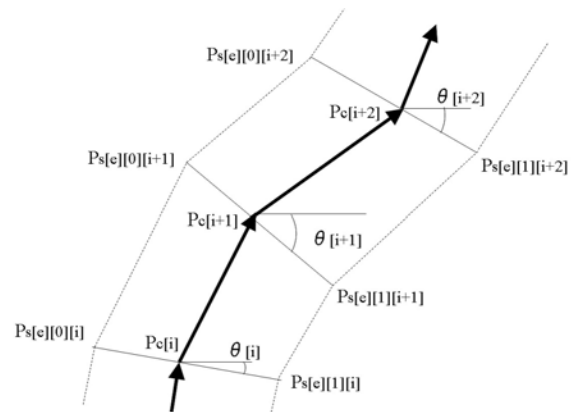


図 6 近似直線と道路断面テンプレートによるポリゴン頂点生成の概念図

とき 2.3(2) 項の手法に加え，作成する各ポリゴン幅を最終的には道路作成方向後方の各ポリゴン幅となるように徐々に幅を変化させながら作成していく．

なお，相手側の道路断面テンプレートに自分と同じタグ情報をもつポリゴンがない場合，既にタグが一致したポリゴンの隙間を埋めるように自身のポリゴンを作成する，または自身のポリゴンは作成せず代わりに既にタグが一致している隣のポリゴンで自身のポリゴン分の隙間を埋める．どちらの手法をとるかは，道路断面テンプレートの各ポリゴンが持つタグの種類に依存する．例えば，タグが車線の場合は前者，車線区分線の場合は後者の手法となる．これにより車線区分線が他の車線区分線と不自然に接続されるといった変形を回避している．

図 8 に以上の手法を適用した道路断面テンプレート変化部の 3 次元形状自動生成の一例を示す．図 8(a) は異なる道路断面テンプレートの接続前の状態であり，歩道や車線といったタグのマッチングを行い，白い矢印の向きに道路ポリゴンが接続される．図 8(b) が図 8(a) の状態から自動生成した道路 3 次元形状である．異なる道路断面テンプレート同士がスムーズに接続された道路 3 次元形状が生成できている．

(4) 交差点部の 3 次元形状自動生成

道路の大きな特徴である交差点は，2 つ以上の道路線形の交差によって構成される．図 9 に，交差点の 3 次元形状自動生成の一例を示す．図 9(a) は，単純に道路線形を交差させた状態で 2.3(2) 項の手法で作成した 3 次元形状である．一般的なモデリングソフトや文献 [6] などでは実際の交差点と同様のモデルを作成するには，図 9(a) の状態からユーザーがポリゴンの除去，接合，テクスチャ貼り付け等

の操作を行うことで交差点モデルを作成する必要がある．

本 DBGS では，道路線形を交差させるだけで，以下に述べるように 2.3(3) 項の手法を応用することで交差点の 3 次元形状が自動生成される機能を実現した．まず車線より外側部分について，自分の道路と隣接する道路をマッチング対象とみなし，2.3(3) 項の手法を利用して道路断面テンプレートのタグ情報から接続相手を判断，滑らかに接合されるようにポリゴンを自動生成する．これを交差点から伸びる全ての道路に対して複数回行うことで，交差点の車両走行部以外が形成される．次に交差点内部にあたる車両走行部において，隙間を埋めるように新たなポリゴンを作成する．さらに交差点の大きさ，交差道路の角度を基準として横断歩道，停止線が自動生成され，生成された横断歩道の位置を参照して信号機が自動的に配置される．以上の手法で自動生成された交差点部の 3 次元形状を図 9(b) に示す．図 9(a) の状態では，交差点にあたる部分で交差する道路 3 次元形状のポリゴンが重なり合っているが，図 9(b) ではそれらが除去され，歩道部のスムーズな接続，車両走行部分のポリゴン生成，その他の要素（停止線，横断歩道，道路標示，信号機）の生成がなされている．

2.4 地図データにもとづく建物 3 次元形状の自動生成手法と適用事例

(1) 自動生成手法

地図データから抽出した建物フットプリント（建物の外枠）を用いて，パターンマッチングによる建物モデルの自動生成及び自動配置を行う機能を実現した．図 10 に DBGS が地図データからフットプリントを抽出した状態を示す．図中の白線形状がフットプリントであり，1 つのフットプリントは閉じた 2 次元の線分の集合で構成されている．次に図 11 に， 8×8 マス内に収まるよう，フットプリントを正規化した一例を示す．また図 12 にパターンマッチング用の置換パターンの一例を示す．これら置換パターンも 8×8 マス内に収まるような形状をしている．

図 13 が正規化したフットプリントと置換パターンとのパターンマッチングの一例である．正規化したフットプリントは (a) では黒く塗りつぶされているマスの部分であり，(b)，(c)，(d) では太枠で囲った領域として表されている．(b)，(c)，(d) 中の黒く塗りつぶされているマス部分が各置換パターンの領域であり，白い丸の位置するマスが置換パターンと正規化されたフットプリントの領域が互いに重なっているマス，またはどちらにも重なっていないマスである．このマスに該当しないマスの数が少ないほど類似度が高いことになるため，図 13 では (c) が入力されたフットプリントの最終的な置換パターンとなる．このように，入力された複雑な形状のフットプリントを単純な形状へ正規

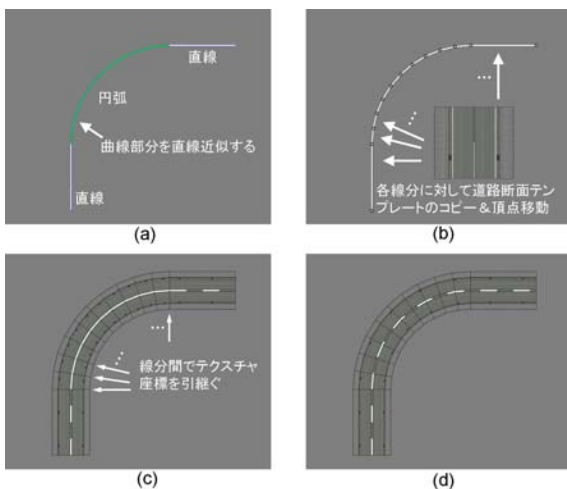
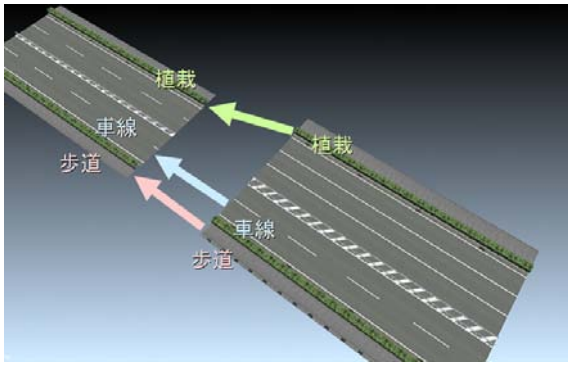
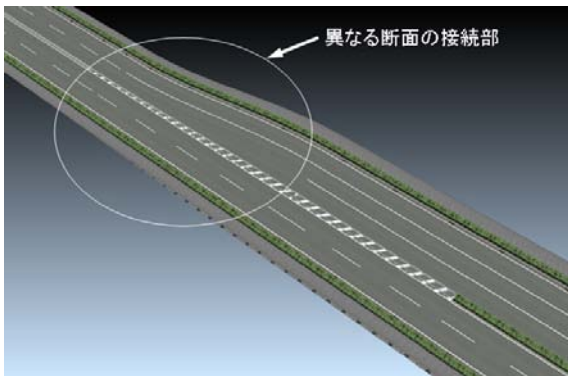


図 7 基本的な道路 3 次元形状生成の一例：(a) 直線近似前の道路線形，(b) 直線近似後の道路線形，(c) 近似直線をもとにポリゴン生成した道路 3 次元形状，(d) テクスチャ座標引継ぎを行った道路 3 次元形状



(a)



(b)

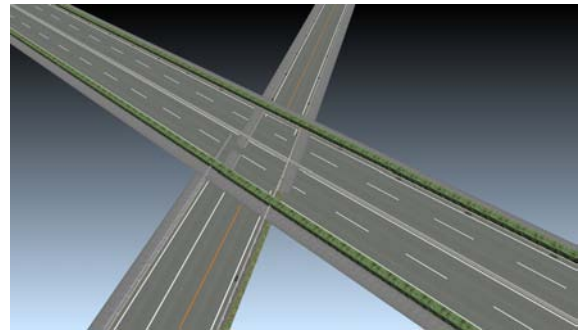
図8 道路断面テンプレート変化部の3次元形状自動生成の一例：(a) 接続前の道路断面テンプレート，(b) 接続後の道路断面テンプレート

化することで、置換パターンと比較することが容易となり、処理時間の短縮にも繋がる。

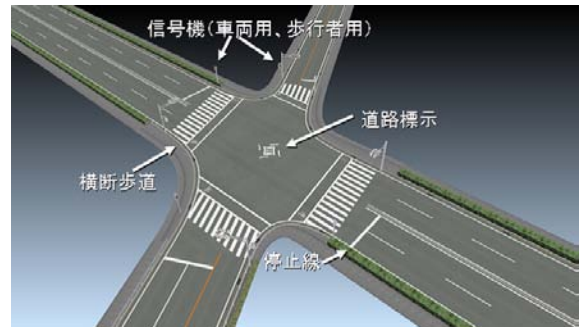
次に、置換パターンを正規化前のフットプリントの大きさに拡大する。ここで、フットプリント自体には建物の種別や高さの情報が含まれていない。本 DBGS ではこれらの情報を、ユーザーが指定する、または別の地図データから入力する、という方法に加え、フットプリントの面積をもとに推測する機能を実現した。これにより、そのフットプリントに該当する実際の建物の情報とは異なるが、フットプリントの情報のみから自動で理にかなった町並みを再現することが可能となる。最後に、木造家屋であれば屋根用のポリゴンを追加、ビルであればビル用のテクスチャを貼り付ける、というようにあらかじめ DBGS にプログラムされている建物生成ルールに則り、フットプリントを家屋、ビルなどの種別ごとに3次元形状の生成とテクスチャ貼り付けが自動的に行われる。

(2) 適用事例

地図データ中のフットプリントから自動生成された建物



(a)



(b)

図9 交差点の3次元形状自動生成の一例：(a) 交差させただけの道路3次元形状，(b) DBGSにより自動生成した交差点部の3次元形状

モデルの一例を図14に示す。(a),(b),(c)は同一のフットプリントが基になっており各建物モデルの下部にある黒い線群がそれを表す。(a)がテクスチャ無、(b)がテクスチャ有の状態を示している。(a),(b)ともに左から木造家屋、コンクリート家屋、ビルを表す。また、(c)は3つとも建物種別が同じビルであるが、高さおよびテクスチャが異なる例である。(d)も同じく同一フットプリントから生成され、建物種別が同じビルであるが、テクスチャやモデルの詳細部分が異なる例である。このように、異なるフットプリントだけでなく、同じフットプリント形状からも多彩な建物モデルの自動生成が可能である。

2.5 標高データにもとづく地形3次元形状の自動生成手法と適用事例

標高データおよび航空写真や衛星写真等の画像データをもとに地形の3次元形状を自動生成する機能を実現した。標高データには国土地理院の50mメッシュ標高や航空レーザー測量等によるDEM^{*4}が利用可能である。DBGSへ標高データをロードするにあたって、メッシュサイズがデー

*4 DEM: Digital Elevation Map デジタル標高地図

タによって異なること、またユーザーが最終的な地形 3 次元形状の分解能をコントロール可能とする必要があることから、本 DBGS ではユーザーが指定した分解能に合わせて自動的にデータを補間して組み合わせる機能を実装した。

図 15 に、標高データにもとづいて DBGS により自動生成した地形の 3 次元形状の一例を示す。図 15(a) は国土地理院作成の 50 m メッシュ標高データをもとに、10m 間隔のメッシュとして作成した地形の 3 次元形状をワイヤフレーム表示した状態である。メッシュの各頂点座標には地図上の位置情報および標高が入力されている。図 15(a) のメッシュをもとに航空写真テクスチャを位置情報にもとづき自動で貼付けたデータが図 15(b) である。このように種類の



図 10 地図データから建物のフットプリントを抽出した状態：わかりやすいように航空写真を背景に重ねており、白線部分がフットプリントを表す。

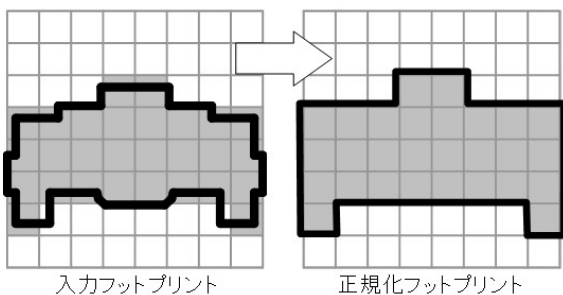


図 11 フットプリントの正規化の一例

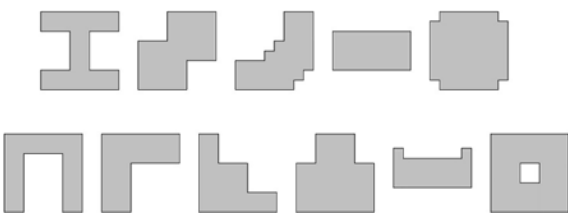


図 12 パターンマッチング用の置換パターンの一例

異なるデータを地形の自動メッシュ化および航空写真貼り付けによって統合し、詳細な地形 3 次元形状の自動生成が可能である。

3 むすび

本稿では、ドライビングシミュレータ向けの道路、建物、地形を含む視界発生用データベース (DB) を、プロシージャル技術を用いて効率的に作成することが可能なデータベース生成システム (DBGS) について述べた。道路 DB については、実際の道路設計と同じ手法による道路線形の利用、および道路断面テンプレートを用いたパターンマッチングにより車線増減部および交差点部を含む道路 3 次元形状の自動生成を実現した。また建物 DB については、地

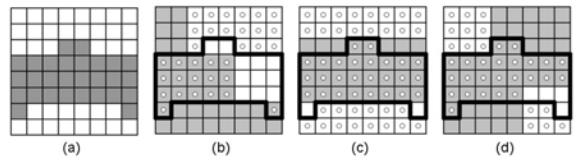


図 13 フットプリントと置換パターンとのパターンマッチングの一例：(a) 入力されたフットプリント (黒いマスの領域)、(b)(c)(d) 入力されたフットプリント (太枠で囲った領域) とマッチング対象の置換パターン (黒いマスの領域)、白い丸の位置するマスが少ないほど類似度が高い。

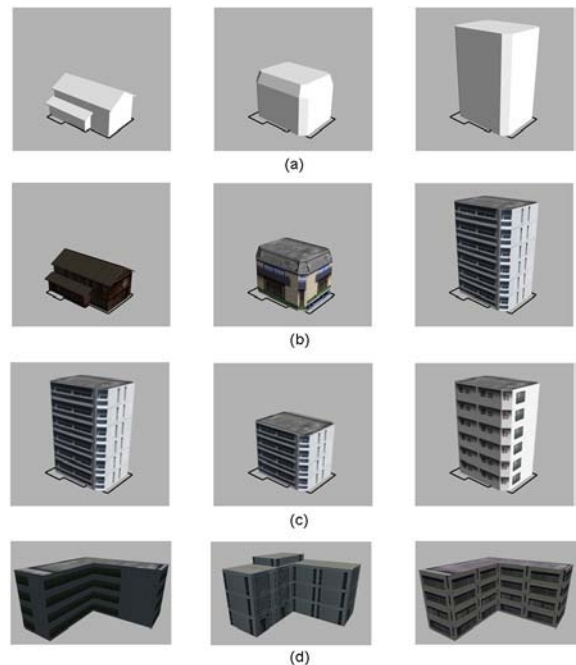


図 14 DBGS によって同一のフットプリントパターンから自動生成した異なる建物モデルの一例：(a) 種別が異なる建物モデル (テクスチャ無し状態)、(b) 種別が異なる建物モデル (テクスチャ有り状態)、(c) 高さやテクスチャが異なる同じ種別の建物モデル、(d) モデルの詳細やテクスチャが異なる同じ種別の建物モデル

図データに含まれる 2 次元の建物形状情報を用いたパターンマッチングにより自動で建物種別の推定, 高さ推定, および 3 次元形状の作成, 配置とテクスチャ貼り付けを行った。地形 DB については, 異なる密度の標高データの補間による統合と, 航空写真の位置情報の参照による貼り付けを行うことで詳細な地形 3 次元形状の自動生成を実現した。

このシステムを利用することで従来の数 km^2 の DB を作成するのと同じ労力で, 数十 km^2 の広域 DB を作成することが可能となった。これは, 広域市街地を対象範囲として, 交通流等の変化も加味したダイナミックなシミュレーションの実現可能性に繋がるものである。また同時に, 従来はシミュレータのユーザーが独自に DB を作成することは敷居が高かったが, 本 DBGS を利用することで DB 作成の技術を有しないユーザーでも短時間で DB の作成・変更を行うことが可能となる。ドライビングシミュレータは事故低減を目的とした研究において, 所望の道路形状や景観を構築し, その模擬空間の中で事故などの実験データを蓄積していく手段として極めて有効であり, ユーザー自身が柔軟にデータベースを構築できる環境が整った事はその有用性をさらに高めるものである。今後もシミュレータの有効性を高めていくため, さらなる DB 作成の自動化・支援機能の充実とその模擬精度向上を継続して実施していく予定である。

参考文献

- [1] 須田義大, 椎葉太一, 荒木厚, 大貫正明, “ドライビングシミュレータにおけるバーチャルリアリティ技術,” 自動車技術, Vol.56, No.6, pp.36-41, 2002.
- [2] 赤松幹之, 大貫正明, “ドライビングシミュレータに

おけるリアルワールド再現技術の最新動向,” 自動車技術, Vol.61, No.7, pp.78-84, 2007.

- [3] 米川隆, 阿賀正巳, 門脇美佐, 名切末春, 坂口靖雄, 荒木厚, “市街地走行で現実感のあるドライビングシミュレータの開発,” 自動車技術会学術講演会前刷集, Vol.36-08, pp.1-8, 2008.
- [4] 北島章雄, 戸田裕毅, “日本自動車研究所向け全方位視野ドライビングシミュレータ,” 三菱プレジジョン技術報, Vol.5, pp.1-6, 2010.
- [5] 宮田一乗, “ゲームとエンタテインメント技術 (2) ゲームと CG - プロシージャル技術,” 映像情報メディア学会誌, Vol.63, No.8, pp.1107-1112, 2009.
- [6] 杉原健一, 林良嗣, “仮想環境としての 3 次元道路モデルの自動生成,” 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.101, No.701, pp.13-18, Mar. 2002.
- [7] 杉原健一, 林良嗣, “3 次元建物モデルの自動生成のための一般化建物ポリゴン,” 土木情報利用技術論文集, Vol.15, pp.64-74, Oct. 2006.
- [8] Yoav I. H. Parish, Pascal Müller, “Procedural Modeling of Cities,” Proceedings of ACM SIGGRAPH 2001, pp.301-308, 2001.
- [9] Guoning Chen, Gregory Esch, Peter Wonka, Pascal Müller, Eugene Zhang, “Interactive Procedural Street Modeling,” ACM Trans. Graph., Vol.27, No.3, 2008.
- [10] Bruneton Eric, Neyret Fabrice, “Real-time rendering and editing of vector-based terrains,” Eurographics, Vol.7, No.2, 2008.

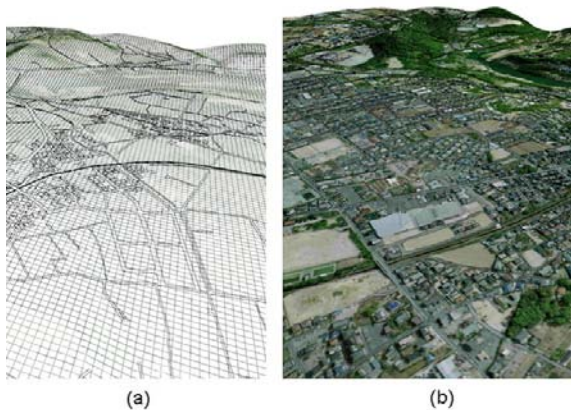


図 15 DBGS により自動生成した地形の 3 次元形状の一例: (a) 標高データを補間しメッシュ状にした地形の 3 次元形状 (ワイヤフレーム表示), (b) 航空写真をテクスチャとして貼り付けた状態の地形の 3 次元形状

[執筆者紹介]



林 隆伯 略歴

2005年入社，主にデータベースジェネレーションシステム関連技術の開発に従事．

現在，技術開発部映像自動合成システムグループ所属



川上 隆行 略歴

2001年入社，主に実時間コンピュータグラフィックスのソフトウェア開発に従事．

現在，技術開発部映像自動合成システムグループ所属



中野 泰子 略歴

2009年入社，主にデータベースジェネレーションシステム関連技術の開発に従事．

現在，技術開発部映像自動合成システムグループ所属

術前計画型手術シミュレータ用生体モデルデータ生成システムの開発

高波健太郎，中山 聡，長坂 学，坂本英男，
後藤修一，乾谷 徹，本郷 新，菊川孝明

要旨： 患者個別に対応する術前計画型手術シミュレータに用いる生体モデルデータ生成の精度向上と高速化に関する論文である．CT断層画像をもとに患者固有の生体データを抽出し，シミュレーション用データを生成するシステムを構築した．臓器抽出では，拡張3次元リージョングローイング法を実装することで臓器抽出の精度を向上し，作業時間を短縮した．また，改良型マーチング・キューブ法および改良型3次元デローニ法を考案し，形状精度を維持し，実時間処理を考慮した有限要素データを生成可能なロバストなシステムを構築した．現在，横浜市立大学付属病院泌尿器科に本手術シミュレータを試験導入し，臨床評価を実施中である．

1 まえがき

医療の現場では腹腔鏡下手術など低侵襲手術^{*1}の発達により外科手術における患者の負担が軽減されている．(横浜市立大学付属病院 泌尿器科手術件数の推移を表1に示す．腹腔鏡下手術は増加傾向である)．これらの最先端医療には高度な専門知識と熟練が必要であるため効果的な教育訓練システムが求められるなか，仮想現実(VR)技術を用いて手術を模擬する手術シミュレータが注目されている．この装置は計算機上に構築した人体と疾病のデータベースにもとづき，仮想的な手術環境を作り出すもので，多くの研究開発が行われている[1, 2, 3, 4]．

手術の安全性向上への試みには，教育訓練による術者の技術向上と並んで，患部周辺の状態を正確に把握し，術前の計画を充実させる観点もある．手術は患者の診断データに基づいた計画のもとに個別に行われるため，患部の状態により術法が異なる．腎臓摘出手術の例では，腎動脈の形状は約30%の確率で奇形が見られ，これに起因する事故が発生する可能性がある．このことから，患者固有の症例にもとづいた術前計画，および術前リハーサルが可能な計画型手術シミュレータが期待されている．

近年，訓練用VR手術シミュレータが大学病院を中心に導入されつつあるが，これらが用いる生体データ形状は同様であり，患者個別の対応は実現できない．これは，適用するバネに基づく力学モデルでは，患者固有のモデル形状を用いた場合，変形模擬にて安定的な解を得られないためである．高精度で安定的な解を得るためには，バネモデルに替わり有限要素法を適用することが考えられ，近年その試みの報告[3, 4, 5]があるが，手術シミュレータシステムと

表1 横浜市立大学医学部附属病院泌尿器科 腎臓関連年間手術件数の推移

| 年度 | H15 | H16 | H17 | H18 | H19 | 計 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 全手術件数 | 94 | 103 | 96 | 91 | 124 | 508 |
| 腹腔鏡下手術の件数 | 33 | 43 | 40 | 57 | 96 | 269 |
| 腹腔鏡下手術割合 | 35% | 42% | 42% | 63% | 77% | 53% |

しての完成報告はみられない．

我々は平成18年から，患者個別に対応する術前計画型手術シミュレータの実用化に向けて，基礎研究を実施した[7, 8]．この手術シミュレータを構成する主要技術には(1)実時間力学計算技術[6, 7, 8, 9, 10]，(2)並列計算技術[7, 8, 11, 12]，(3)ヒューマンインタフェース技術[8, 13]等がある．これらと共に有限要素法を基礎とする患者固有の生体データベース生成技術は，術前計画型手術シミュレータの基盤となる重要な要素であるが，これまでに実現された例がなかった．そこで，臓器形状の精度を保ち，実時間変形シミュレーションを前提とした有限要素法にもとづく生体モデルデータを，診断用CT断層写真から生成可能なシステムを構築したので以下に説明する．2章では生体モデルデータ生成システムの全体構成を，3章ではセグメンテーション(臓器抽出)手法を，4章ではシミュレーション用四面体データの生成手法を，5章では評価について述べる．

2 生体モデルデータ生成システム

生体モデルデータ生成システム(以下，本システム)は診断用のCT断層画像より対象部位を抽出し，手術シミュレータ上で動作する3次元シミュレーションデータ(四面体データ)を構築するためのシステムである．図1に生体データ生成のフローを示す．本システムの処理手順は次に示す7段階の工程がある．

^{*1} 腹壁に数個の穴を開け内視鏡の映像で観察しながら実施する手術．開腹手術と異なり術後の疼痛がほとんどなく，快復や社会復帰が極めて早く，美容的観点からも優れている．

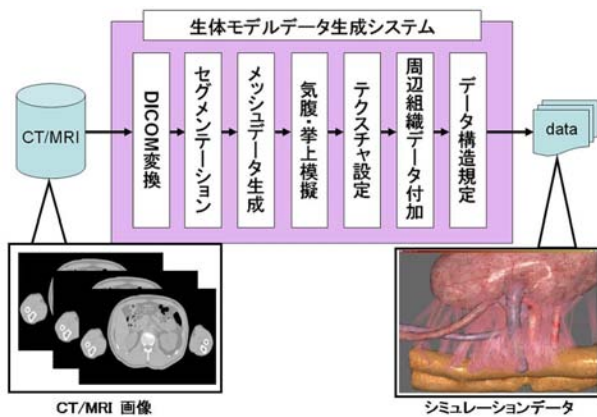


図1 生体データ生成のフロー

- (1) DICOM 変換：DICOM は CT 等医用画像に特化したデータフォーマットであり、タグ情報に内包物のフォーマット名及びデータ長を記載している。これを解析し、必要な CT 断層画像群を分離する。
- (2) セグメンテーション：連続する CT 断層写真から指定した臓器を抽出し、3次元ボリュームデータ（3次元空間内に格子状に分布する濃度値の集合）を構築する。3章に内容を記述する。
- (3) メッシュデータ生成：3次元ボリュームデータを基に、臓器を変形シミュレーション可能な有限要素で構築する。4章に内容を記述する。
- (4) 気腹・挙上模擬：実際の手術では腎血管を処置するために腎臓を移動する。生体モデルデータにおいても同様に腎臓を移動し、手術の状況をあらかじめ設定する。
- (5) テクスチャ設定：臓器に模様のマッピングを施し、視覚的なリアリティを向上させる。
- (6) 周辺組織データ付加：CTでは撮影できないリンパ管や脂肪を付加する。
- (7) データ構造規定：個別に生成した腎臓、腎動脈、尿管、その他臓器がどのような位置関係に配置されるかを定義する。

本論文では、特にデータ生成に必要な作業時間と、臓器データ形状の精度に最も影響を及ぼすセグメンテーション、およびメッシュデータ生成について記述する。

3 セグメンテーション

セグメンテーション (Segmentation) は対象臓器を抽出する工程である。CT 画像は 256 階調の輝度 (濃度) を持つ画素の 2次元分布であり、輝度値の閾値を規定し画素を抽出することが考えられるが、他の臓器も同じ輝度を持つ場合や隣接する CT 画像間の連続性を考慮すると、単に輝度範囲を指定するだけでは対象臓器のみを精度よく抽出で

きなかった。

本システムでは、拡張 3次元リージョングロウイング法を実装し、指定臓器のみの抽出を実現した。これは、3次元リージョングロウイング法の改良型であり、理化学研究所において開発されたアルゴリズム [14] を元の実装したもので、境界があいまいな臓器の抽出を可能とし、手術シミュレータ用臓器データ抽出を初めて実用化した。以下に 3次元リージョングロウイング法と拡張 3次元リージョングロウイング法の特徴を示す。

3次元リージョングロウイング (Region Growing) 法

領域内の 1点からそれに連続する 3次元領域を検索し、取込むことで領域を拡張し、対象領域全体を抽出する手法である。撮像画像中に不連続なノイズがあっても、3次元的に周辺からまわり込むためロバスト性が高い。そのため、2次元画像上では孤立した領域になるような複雑な 3次元形状を持つ領域も抽出可能である。3次元リージョングロウイング法による抽出の 2次元イメージを図 2 に示す。この手順は次のものである。

- (1) 対象とする 3次元画像領域を規定し、輝度の閾値 (抽出領域内か抽出領域外かを規定する基準値) を決定する。
- (2) 閾値基準を満たす 1点を注目点として指定する。
- (3) 注目点に隣接する全点を調査し、閾値基準を満たせばその点をマーキングする。
- (4) マーキングされた任意の 1点へ注目点を移動し、その隣接点について (3) の判定を実施する。
- (5) 注目点の移動が完了するまで (4) を反復する。

拡張 3次元リージョングロウイング法

抽出対象領域の輝度は必ずしも一様ではないため、固定した閾値による判定では局所的な輝度の変動に対応できない場合がある。そこで、注目点の周辺領域で既に獲得済の抽出対象領域と非対象領域の輝度情報を用いて、抽出判定の閾値を動的に変動させ、抽出の精度を上げる手法が拡張 3次元リージョングロウイング法である。周辺領域は注目点の座標を $P(p_x, p_y, p_z)$ と定義した場合、 P を中心として $p_x \pm l, p_y \pm m, p_z \pm n$ (l, m, n は整数) の範囲とし、閾値 θ は以下の式で定義する。

$$\theta = \frac{medT + medF}{2} \quad (1)$$

ここで、

T : 周辺領域における対象領域の画素値の集合

F : 周辺領域における非対象領域の画素値の集合

$medT$: T のメディアン値

$medF$: F のメディアン値

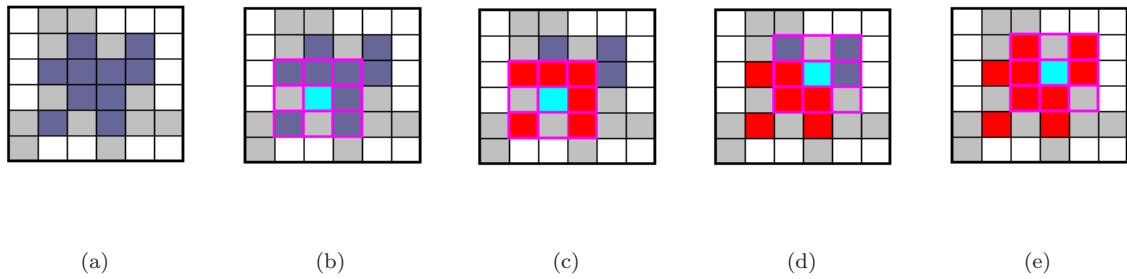


図2 3次元リージョングロウイング法による抽出の2次元的イメージ

- (a) 抽出対象空間：異なる濃度を持つ点の集合で構成されている。まず η の部分を抽出するため基準となる濃度を閾値として設定する。
- (b) 抽出 step1：抽出対象内の注目点 (\bullet の点) を指定し、その隣接する点を抽出領域内か否か判定する。
- (c) 抽出 step2：注目点の隣接点について閾値と比較した結果、抽出対象であればマーキングする (\bullet の点)。
- (d) 抽出 step3：マーキングされた領域の中で注目点を移動し、その隣接点について領域内外を判定する。
- (e) 抽出 step4：新たな注目点の隣接点に対して閾値と比較し、抽出対象であればマーキングする。

である。また、抽出臓器別のコントラストの相違に対応するため、抽出強度調節を可能とするシフト値 α を導入し、最終的な閾値 η として次式を適用した。

$$\eta = \theta - \frac{\alpha}{100} \cdot \frac{medT + medF}{2} \quad (2)$$

$\alpha = 0$ を基準に α の値を増加した場合、抽出判定が緩くなり逆に減少させると抽出判定は厳しくなる。ここで、 $0 \leq \alpha \leq 100$ である。

4 メッシュデータ生成

本手術シミュレータでは有限要素法を用いて生体の変形シミュレーションを実施しているため、抽出した3次元ボリュームデータを4面体有限要素データに変換する必要がある。4面体有限要素への変換は、まず抽出した臓器ボリュームデータの表面を三角形の集合(表面パッチデータ)で近似し、次に臓器内部空間をこの表面パッチデータを基に4面体有限要素で分割する手順で実施する。

手術シミュレータでは変形シミュレーションの精度と実時間性が同時に求められるが、これらは臓器データの詳細度(データ量)に依存する。すなわち、詳細度が高ければ計算精度は得られるが、実時間性は損なわれる。また詳細度が低ければその逆となる。我々は、実時間シミュレーションが可能な範囲にデータ量を抑えると同時にシミュレーション精度を得る臓器データ生成システムを実現するために、表面パッチデータ生成に関してマーチング・キューブ法を改良し、少ないデータで臓器表面形状の精度を得るシステムを構築した。

4.1 表面パッチデータ生成

抽出した臓器の表面を三角形のパッチデータで近似するプロセスである。制限されたデータ量で臓器表面形状の精度を得るために、改良型マーチング・キューブ法を考案し

た。以下にマーチング・キューブ法、および改良型マーチング・キューブ法について説明する。

(1) マーチング・キューブ法

マーチング・キューブ法 [15] は、ボクセルデータ^{*2}から等値面^{*3}を含む立方体を取り出し、その立方体に含まれる等値面を3角形で近似する手法である。このとき、等値面の生成パターンはあらかじめ決まっており、8頂点の立方体から生成される3角形のパターンは256通りである。回転移動、対称移動、ビット反転を考慮して位相的に同じものを整理すると図3 等値面生成パターンに示す15通りになる。各立方体でこの等値面パターンを選択することで等値面を生成する。

この手法では単位立方格子(キューブ)を定義し、各キューブは濃度値を持つ頂点から成ると考える。図4に単

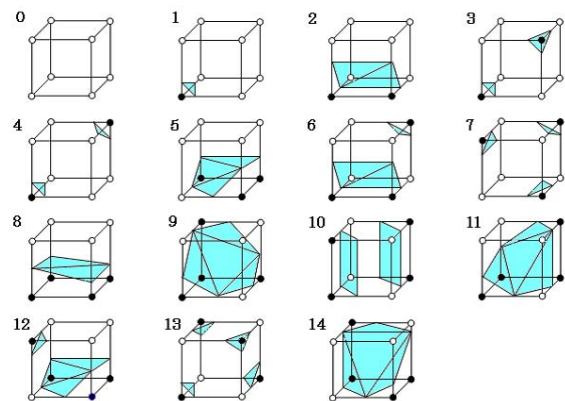


図3 等値面生成パターン

^{*2} 3次元空間に格子状に配置された濃度値(ボクセル)の集合。ここでは臓器ボリュームデータを意味する。

^{*3} 臓器表面を示す

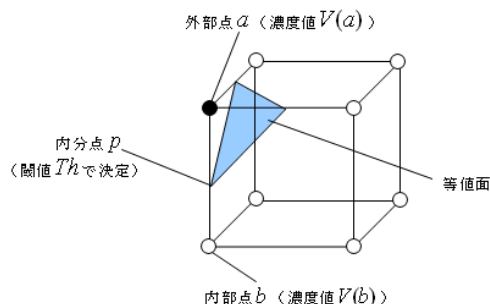


図4 単独キューブにおける等値面生成の例

$V(a)$: 頂点 a の濃度値.
 $V(b)$: 頂点 b の濃度値.
 p : 閾値 Th で規定され、辺 ab を内分する点.

独キューブにおける等値面生成の例を示す。キューブの頂点は、閾値により物体内部または外部の2通りに分類できる。キューブを構成する辺の2頂点 a, b がそれぞれ内部点と外部点であるなら物体表面と辺 ab は交点を1つだけ持ち、頂点 a, b の濃度値 $V(a), V(b)$ と閾値 Th より交点 p は式(3)で与えられる。

$$p = \frac{(V(a) - Th) * b + (Th - V(b)) * a}{V(a) - V(b)} \quad (3)$$

p は辺 ab を $(V(a) - Th) : (Th - V(b))$ に内分する点である。臓器ボリュームデータでは濃度値データが内部または外部の2値データであるため、 p は辺 ab の中点となる。

(2) 改良型マーチング・キューブ法

CT画像から抽出した3次元臓器ボリュームデータの格子間隔は $1mm$ であるが、一辺 $1mm$ のキューブから等値面を生成すると、データ量が膨大となり実時間性が損なわれる。データ量を制限するため、オリジナルのボクセルデータから粗くりサンプリング(間隔は3~6)したボクセルを使用して等値面生成を行う必要がある。このとき、表面形状の精度を保つためリサンプリング間隔内部に本来存在するボクセル情報を利用する改良型マーチング・キューブ法を考案した[19]。

図5に従来型と改良型における等値面形状の比較を示す。従来方式ではキューブの頂点間のデータは存在しないため、等値面は必ずキューブ一辺の中点で交差する。対して、改良方式では本来辺の中点にあるデータが内側か外側かを考慮することで、等値面は辺の中点ではなく、辺の $1/4$ 、または $3/4$ の位置で辺と交差させることができる。従って、基礎となるボリュームデータにより準拠した表面形状が得られる。

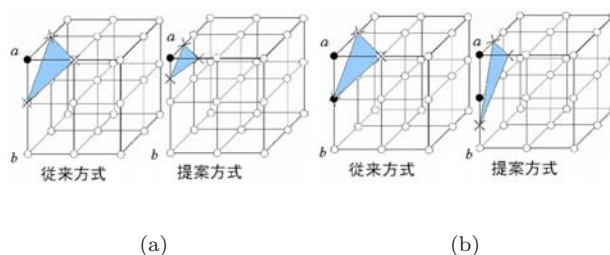


図5 従来型と改良型における等値面形状の比較

(リサンプリング間隔2の場合。ここで、 \circ は境界面の外部にある格子点。 \bullet は境界面の内部にある格子点。 \times は境界面とキューブ構成辺との交点である。)

- (a) 辺 ab 上に内部点が2個、外部点が1個存在する場合。
- (b) 辺 ab 上に内部点が1個、外部点が2個存在する場合。

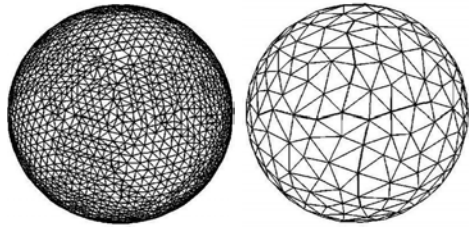
4.2 有限要素データ生成

ここでは、生成された表面パッチデータを元に、その内部空間を有限要素(四面体)で分割する。有限要素法は従来、工学分野における解析法として用いられており、生体の複雑な形状、および実時間計算を考慮した要素分割ソフトウェアは未だ開発されていない。工業用の有限要素データ生成ソフトウェアで臓器モデルを生成するには煩雑なパラメータの調整およびエラーが発生した場合の分割の再実行が必要となり、トータルの作業時間は増加してしまう。そこで、生体の複雑な形状や接合処理に際しても節点数を制御可能であり、かつロバスト性に優れた有限要素分割ソフトウェア(以下、N-Mesh と呼称)を考案し臓器モデルの生成作業時間の短縮を図った。

(1) 既存の有限要素分割ソフトウェアの問題点

生体モデルの有限要素分割機能を持つソフトウェアとして、(独)理化学研究所が開発したVCADシステム(Volume CAD)[20]がある。VCADは解析モデルの生成が目的であり、生成モデルの要素数が多い。そのため実時間シミュレーションに使用するモデルとしては不向きである。

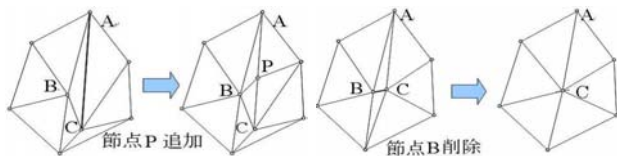
ADVENTURE(以下、ADV と呼称)[21]は日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業「計算科学」分野のADVENTUREプロジェクト(設計用大規模計算力学システム開発プロジェクト)によって開発された有限要素分割ソフトウェアである。ADVでは要素分割に失敗する条件について定量的に示されていないため、要素生成に失敗した際に対策をとることが難しい。また、腎臓と尿管等、接合関係にあるモデルでは共有面に節点を密に配置し、共有面形状を詳細に記述することで一致条件を保持するため、実時間シミュレーションに適した節点数で臓器モデルを生成することが困難である。



(a) (b)

図 6 節点数制御の例

(a) 節点数 4000 . (b) 節点数 400 .



(a) (b)

図 7 節点の追加と削除

(a) 節点を追加する場合．長辺 AC の中点に節点 P を生成する．
 (b) 節点を削除する場合．短辺 BC の節点 B を削除する．

(2)N-Mesh 有限要素分割ソフトウェア

有限要素データ生成の主な手法としては、デローニ三角分割法 [16]、アドバンスングフロント法 [17]、ボクセルメッシュ法 [18] 等があるが、デローニ三角分割法はアルゴリズムがロバストかつ高速であることから、多くの有限要素分割ソフトウェアで用いられている。本システムでは、デローニ分割法を基礎に以下の改良を施し、要素数の制御を可能とした。

節点数の制御処理

節点数制御では、重要度に応じて臓器ごとに表面節点数を指定する。その指定された表面節点数になるよう各臓器で節点の追加・削除処理を自動で行う。図 6 節点数制御の

例に示すように節点を追加するとその臓器の表面三角形は細かく、削除すると粗くなる。このとき、図 7 節点の追加と削除に示すように、節点数を増加させる場合は、臓器ごとに表面三角形のエッジの中で最も長いエッジの中点に追加し、削減する場合は、最も短いエッジを構成する 2 頂点のうち 1 つを削除することで臓器ごとに表面三角形の大きさの不揃いを抑えるように追加、削除を行う。

表面凹部の復元による共有面の再構成処理

デローニ分割では、不要に凹部を埋める四面体（領域外要素）を生成する必要があるため、これらの不要四面体を削除し、凹部を復元する必要がある。また、凹部復元を目的として、意図した形の接合面を生成するためには表面に密に節点を配置する必要があるが、密な節点群の配置は実時間シミュレーションの実現に逆行する上、単に凹部を復元しても接合関係にある対面間で共有面が一致しない。そこで、図 8 に示すコピー点生成による接合部のメッシュ化手法により節点数を増加させずに共有面を一致させ、かつ凹部を復元した。以下図 8 に従い説明する。

(a) 共有面の重心を通る法線に、重心から一定距離にコピー点を生成する。(b) このコピー点は一方のモデルにとっては面の外側、他方のモデルにとっては面の内側に位置する。(c) コピー点を含めてモデル A、モデル B それぞれデローニ分割を行う。(d) 面の外側にコピー点を持つモデル A では「コピー点を持つ四面体」を削除する。面の内側にコピー点を持つモデル B では「コピー点を持たない四面体」を削除する。四面体が削除されると、接合関係にあるモデル間で共有面が一致する。

5 評価

5.1 拡張 3次元リージョングローイングによるセグメンテーションの評価

図 9 に腎臓周辺 CT 画像から大動脈血管を指定して抽出した実験結果を示す。(a) 閾値輝度の指定および (b) 3次

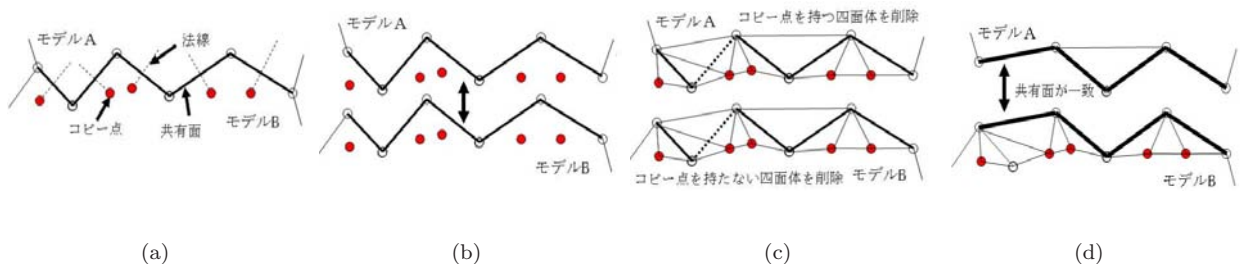


図 8 コピー点生成による接合部のメッシュ化手法

(a) 共有面の重心に法線を引き、法線に重心から一定の距離にコピー点を生成する。
 (b) コピー点はモデル A にとっては面の外側、モデル B にとっては内側に生成される。
 (c) コピー点を含めてモデル A、モデル B それぞれでデローニ分割を行う。
 (d) モデル A では「コピー点を持つ四面体」を削除する。モデル B では「コピー点を持たない四面体」を削除する。

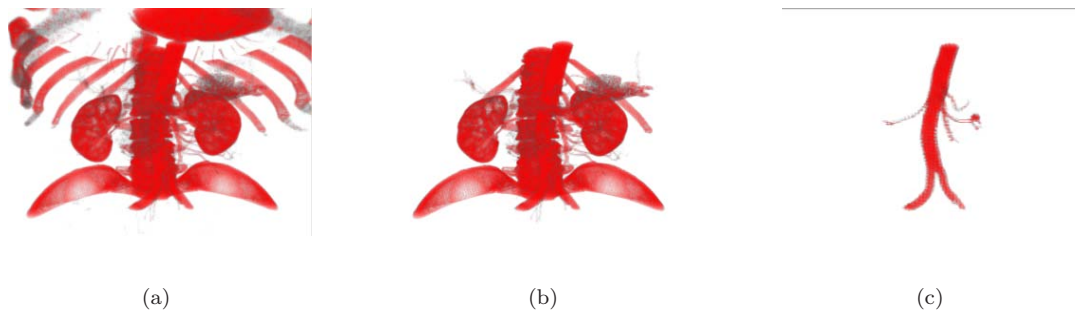


図9 腎臓周辺CT画像から大動脈血管を指定して抽出した実験結果

- (a) 指定した輝度基準値の範囲内の画素を全て抽出した場合．不要な部分が抽出されてしまう．
- (b) 3次元リージョンローイング法による抽出結果．血管と接触し，同等の輝度を持つ不要部分が抽出されてしまう．
- (c) 拡張3次元リージョンローイング法による抽出結果．大動脈およびそれに連続する血管のみが抽出される．

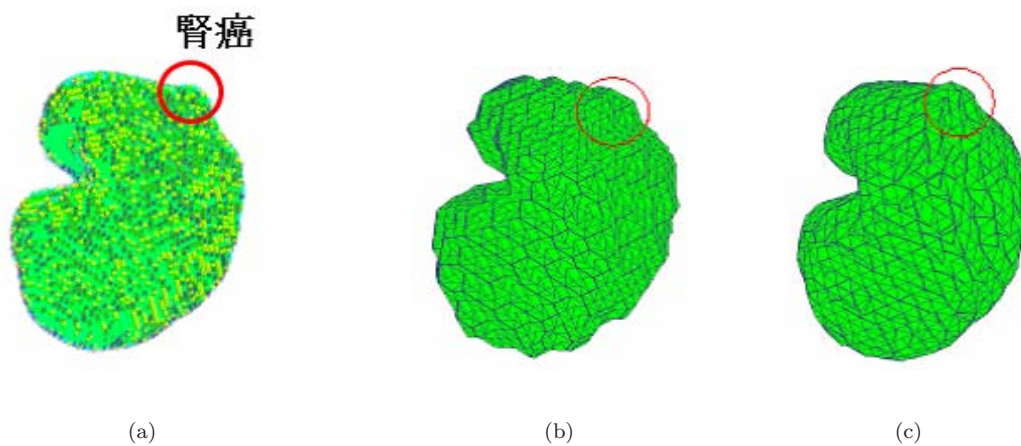


図10 腎臓のポリウムデータとポリウムデータから生成した表面パッチデータ

- (a) セグメンテーションにて抽出した腎臓のポリウムデータ．腫瘍により一部表面が隆起している．
- (b) 従来型マーチング・キューブ法により生成した表面データ．1712 三角形で構成．表面に凹凸があり，腫瘍の判別が困難である．
- (c) 改良型マーチング・キューブ法により生成した表面データ．1712 三角形で構成．腫瘍の形状が保持されている．

元リージョンローイングでは，不要な臓器が抽出されるが，(c) 拡張3次元リージョンローイングでは，大動脈とその周辺の血管のみが抽出されている．

5.2 改良型マーチング・キューブ法による形状再現の評価

腎臓のポリウムデータとポリウムデータから生成した表面パッチデータを図10に示す．CT画像から抽出した腎臓ポリウムデータ(a)では，腎臓表面に腫瘍があることがわかる．従来型マーチング・キューブ法の表面パッチデータ(b)では，正常な腎臓表面が滑らかでないため腫瘍が判別しにくい．しかし改良型マーチング・キューブ法(c)では，実際の形状(ポリウムデータ)により近く，腫瘍の存在も明確になる．

5.3 N-Meshによる要素分割の評価

N-Mesh, ADVで同一のモデルを要素分割し評価を行った．評価項目は「要素分割の成否」「生成時間」および「要素形状」とした．要素形状の評価には式4に示す逆アスペクト比 p を用いた．逆アスペクト比は0~1の値で，1に近

いとその形状が正四面体に近い．

$$p = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{H_{max}}{L_{max}} \quad (4)$$

ここで H_{max} はその四面体の最大高さ， L_{max} は最大辺長である．テストモデルは次の3つのパターンを用いた．(1)球体，(2)腎臓，(3)腎臓周辺全て(内訳は腎臓，腎動脈，腎静脈，大動脈，大静脈，尿管，および性腺静脈)

表2 要素分割時間および逆アスペクト比の比較

| 評価用データ | 要素分割時間 | | 逆アスペクト比値 | |
|--------|--------|------|----------|------|
| | N-Mesh | ADV | N-Mesh | ADV |
| 球体 | 54 秒 | 41 秒 | 0.59 | 0.60 |
| 腎臓 | 48 秒 | 42 秒 | 0.61 | 0.58 |
| 腎臓周辺全て | 480 秒 | 失敗 | - | - |

要素分割時間および逆アスペクト比の比較を表2に示す．単体モデルの場合，N-MeshよりもADVのほうが処理時間は短い．しかし，ADVは腎臓周囲モデルを数時間要して

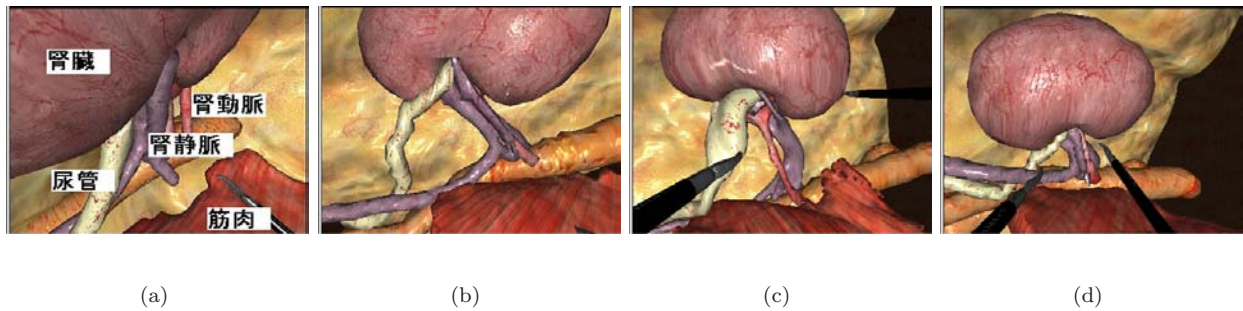


図 11 手術シミュレーションにおける腎臓周辺臓器形状

- (a) 患者 A：腎動脈は 2 本，腎静脈は 1 本あり複雑に分岐している．
- (b) 患者 B：腎動脈は 1 本，腎静脈は 2 本，尿管には湾曲がある．
- (c) 患者 C：腎動脈は 1 本で分岐がある．腎静脈も 1 本で分岐あり．尿管には肥大がある．
- (d) 患者 D：腎動脈は 1 本，腎静脈は 2 本ある．

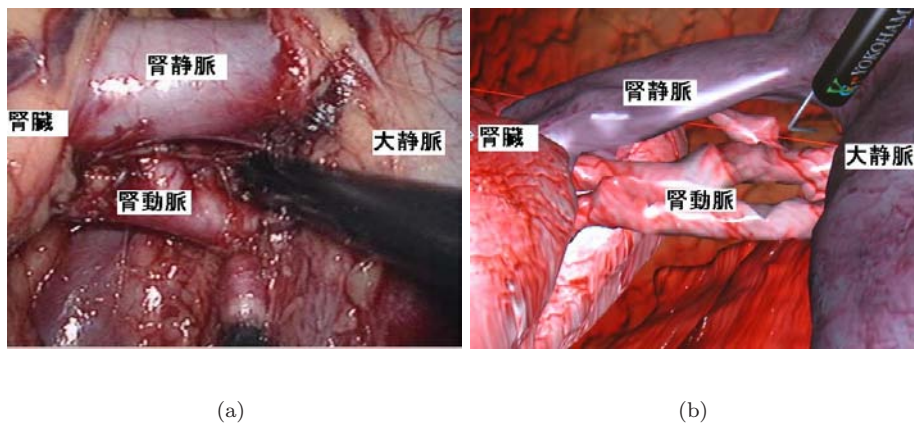


図 12 実際の腎臓血管周辺手術のビデオ映像と手術シミュレーション画像の比較

- (a) 実際の手術のビデオ映像． (b) 手術シミュレーション画像．

も生成できなかったのに対し，N-Mesh では 10 分未満で処理が終了した．このことから，臓器モデルを生成する場合，ロバスト性で N-Mesh は優れている．これは再調整と分割の再実行が不要であることから作業時間短縮に寄与する．このとき逆アスペクト比は N-Mesh，ADV で同等である．

5.4 患者固有データの手術シミュレータへの適用

本生体データベース生成システムにより生成した患者固有の腎臓周辺データを，4 名の患者 A～D について手術シミュレータに適用した例を図 11 手術シミュレーションにおける腎臓周辺臓器形状に示す．患者それぞれについて，腎血管や尿管の形状，および走行パターンに特徴があり，それらを確認することが可能である．また，実際の腎臓血管周辺手術のビデオ映像と手術シミュレーション画像の比較を図 12 に示す．生体組織の位置関係がほぼ一致していることがわかる．今後，複数の症例について，実手術場面とシミュレーションとの比較検討を継続し，評価手法を確立する必要がある．

6 むすび

CT 断層画像をもとに患者固有の生体データを抽出し，手術シミュレーション用データを生成するシステムを構築した．臓器抽出には，拡張 3 次元リージョングローイング法を実装することで臓器の抽出精度を得るとともに処理時間を短縮した．また，改良型マーチング・キューブ法および改良型 3 次元デローニ法を用いて，実時間処理を考慮した要素数のデータを生成可能な，ロバストなシステム構築を行った．

今後，横浜市立大学附属病院 泌尿器科において，本手術シミュレータの臨床での評価を継続すると共に，運用実績を蓄積し高度医療制度^{*4}の適用へむけて推進する計画である．また，本手術シミュレータの基盤技術はさまざまな診療科へ拡張が可能であることから，今後対象範囲を拡大し，本手術シミュレータの普及と医療安全への貢献を目指す．

*4 未承認診療と保険診療の併用を認める制度．

謝 辞

ご指導頂いた横浜国立大学名誉教授 土肥康孝先生, 梶原技術士事務所 梶原景範氏, 有限会社ブサイ 藤野勝氏, 緒方正人主席技師長; 模擬術具開発に貢献された寺田尚史氏; 共同研究者である横浜市立大学大学院医学研究科教授 窪田吉信先生, 同准教授 槇山和秀先生, 理化学研究所 次世代生命体統合シミュレーション研究推進グループ グループディレクター 姫野龍太郎氏, 同生物研究基盤構築チーム チームリーダー 横田秀夫氏, 同客員研究員 島井博行氏に深謝する.

参考文献

- [1] P.Meseure, J.Davenne, L.Hilde, J.Lenoir, L.France, F.Triguet, C.Chailou, "A Physically-Based Virtual Environment Dedicated to Surgical Simulation," IS4TM, pp. 38-47, 2003.
- [2] 向井信彦, 原田雅之, 室井克信, 宮本祐二, 浦谷明宏, 矢野徹, "PC ベースリアルタイム手術シミュレータの開発," 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. 84, no. 6, pp.1213-1221, 2004.
- [3] 井上悠介, 増谷佳孝, 石井宏一, 熊井規, 木村文彦, 佐久間一郎, "有限要素法及び可変形ポリウムレンダリングを用いた高画質な手術シミュレーションシステムの開発(手術シミュレーション)," 電子情報通信学会, Vol. 87, no. 1, pp. 271-280, 2004.
- [4] M.Nakao, K.Minato., N.Kume, S.Mori, S.Tomita, "Vertex-preserving Cutting of Elastic Objects," IEEE Virtual Reality, pp. 277-278, 2008.
- [5] C.Mendoza, C.Laugier, "Tissue Cutting Using Finite Elements and Force Feedback," IS4TM, pp.175-182, 2003.
- [6] 菊川孝明, 長坂学, 緒方正人, "実時間物理シミュレーション-手術シミュレータにおける生体の実時間変形計算法-, "Visual Computing グラフィクスとCAD 合同シンポジウム予稿集, Vol.2007, pp.129-134, Jun. 2007.
- [7] 土肥康孝, 緒方正人, 菊川孝明, 長坂学, 坂本英男, "研究報告 手術シミュレータに関する基礎研究 2004年-2009年," 三菱プレジジョン技報, Mar. 2009.
- [8] 緒方正人, 長坂学, 乾谷徹, 坂本英男, 本郷新, 菊川孝明, 高波健太郎, "患者固有データに基づく手術手技訓練用シミュレータの開発," Computing/グラフィクスとCAD 合同シンポジウム予稿集, Vol.2010, 2010.
- [9] M.Nagasaka, K.Takanami, S.Hongo, T.Terada, T.Kikukawa, M.Ogata, "Real-Time Deformation Model Using Patient-Specific Medical Data," ACM SIGGRAPH posters, 2007.
- [10] 乾谷徹, 緒方正人, 長坂学, 土肥康孝, 坂本英男, 菊川孝明, "手術シミュレータへの応用を想定した実時間大変形処理の評価と実装," 計算工学講演会論文集, Vol.15, no.2, pp. 535-538, 2010.
- [11] M.Ogata, K.Kajihara, T.Kikukawa, T.Terada, "An Evaluation of the Communication Cost of Parallel Processing in Real-Time Simulations Using an Image-Composition Device," Journal of IPSJ, Vol. 47, no.7, pp. 81-89, 2006.
- [12] 緒方正人, 長坂学, 菊川孝明, 土肥康孝, "大規模なデータを扱える共役勾配法の GPU への実装," 計算工学講演会論文集, Vol.15, no.1, pp.115-118, 2010.
- [13] 岡崎博善, "ハプティックデバイスの開発," 三菱プレジジョン技術報告, no. 1717, pp. 1-34, 1999.
- [14] H.Shimai, H.Yokota, S.Nakamura, R.Himeno, "Extraction from Biological Volume Data of a Region of Interest with non-uniform Intensity," Proceedings of SPIE Vol.6051 Optomechatronic Technologies 2005(ISOT 2005), SPIE no.6051, pp. 605115.1-10, 2005.
- [15] W.E.Lorensen, H.E.Cline, "Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm," ACM SIGGRAPH Computer Graphics, Vol. 21, no.4, pp. 163-169, Jul. 1987.
- [16] 谷口健男, "FEM のための要素自動分割," 森北出版株式会社, Sep. 1992.
- [17] S.H.Lo, "Volume Discretization into Tetrahedra-I, Verification and Orientation of Boundary Surface," Computers and Structures, Vol.39, no.5, pp. 493-500, 1991.
- [18] D. D. Zeeuw, K. G. Powell, "An Adaptively Refined Cartesian Mesh Solver for the Euler Equations," Journal of Computational Physics, Vol. 104, no. 1, pp. 56-68, 1993.
- [19] 高波健太郎, 藤野勝, 長坂学, 菊川孝明, 緒方正人, "ボクセル情報を用いたマーチング・キューブ法における等値面分解能の向上," 情報処理学会 第 134 回グラフィクスとCAD 研究会予稿集, pp.7-12, 2009.
- [20] (独) 理化学研究所 <http://vcad-hpsv.riken.jp/jp/>
- [21] ADVENTURE PROJECT <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>

[執筆者紹介]



高波 健太郎 略歴
2002 年入社，フライトシミュレータ，鉄道シミュレータのソフトウェア設計を経て，手術シミュレータの研究開発に従事．現在，技術開発部 画像情報グループ



中山 聡 略歴
2009 年入社，手術シミュレータの研究開発に携わり，その後，人工衛星搭載機器の開発に従事．現在，宇宙機器部 宇宙制御システム課



長坂 学 略歴
2001 年入社，フライトシミュレータの開発設計を経て，手術シミュレータ研究開発に従事．現在，技術開発部 画像情報グループ



坂本英男 略歴
2007 年入社，入社以来手術シミュレータの研究開発に従事し現在に至る．現在，技術開発部 画像情報グループ



後藤修一 略歴
2007 年入社，3 次元復元の研究開発および手術シミュレータの研究開発に従事し現在に至る．現在，技術開発部 画像情報グループ



乾谷 徹 略歴
2008 年入社，コンピュータビジョンに関する研究開発を経て，手術シミュレータの研究開発に従事．現在，技術開発部 画像情報グループ



本郷 新 略歴
1990 年入社，主にフライトシミュレータの開発設計を経て，手術シミュレータの研究開発に従事．現在，技術開発部 画像情報グループ



菊川 孝明 略歴
1990 年入社，画像発生装置の研究開発およびドライビングシミュレータの開発設計を経て，手術シミュレータの研究開発に従事．現在，技術開発部 画像情報グループ

マルチボディダイナミクスにおける高次ルンゲクッタ法による 車両運動モデルのリアルタイムシミュレーション

佐々布 直明, 伊藤 広明, 大貫 正明

要旨: マルチボディダイナミクス*において, 速度拘束式を満たすように拘束力を解き, かつ時間積分法に高次精度の陽的ルンゲクッタ法を適用した方法 (Velocity-Based Runge-Kutta Method, 以下, VBRK 法) を新たに定式化した. VBRK 法は, リアルタイム物理エンジンに最も普及している Stewart らの方法^[1] に対し, 拘束条件において, 拘束等式のみを考慮したものであり, 2 次精度以上の場合, 時間積分による局所誤差が少ない利点がある. また, 系の物体, 拘束条件, バネ・ダンパ等の属性を入力として, 4 次精度の VBRK 法を用いて系の拘束運動を自動計算するプログラム (以下, VBRK4Dyna) を実装した. 研究用ドライビングシミュレータ環境において, VBRK4Dyna の拘束条件数に対する 1 ステップ当りの平均計算時間と, VBRK4Dyna による拘束条件数 76 以下の独立懸架式サスペンションを有する車両運動モデルのリアルタイムかつ安定的なシミュレーションが可能である事を示した.

1 まえがき

研究用 DS^{*1}は, 車両運動制御, ITS^{*2}関連の研究等のために, 自動車におけるハードウェア, ソフトウェアを評価する HILS^{*3}や SILS^{*4}環境として, 大学, 研究機関, 自動車メーカー等で広く利用されている. 研究用 DS における車両運動の計算結果は, 視野の変化, 動揺装置の臨場感及び速度感に大きく影響を及ぼし, リアルタイムに計算可能な範囲内での模擬精度向上は重要である. 実際に, 幅広い年齢・特性のユーザがより違和感無く走行できることが重視され, 模擬精度向上によって運転の違和感を軽減する事が期待されている^[2].

近年の自動車では, 独立懸架式のサスペンションが多用されており, 独立懸架式を有する車両運動モデルのような複雑な運動計算には, マルチボディダイナミクス (以下, MBD) が利用される. 研究用 DS において, 車両運動モデルのシミュレーションに MBD を適用する際, リアルタイム性及び安定性の向上のために拘束条件式を満たすように工夫をしたり, 計算資源に余裕があり計算精度が求められる場合に, より高次精度の時間積分法を用いたりする事が重要である. そこで, 速度拘束式を満たすように拘束力を解き, かつ時間積分法に高次精度の陽的ルンゲクッタ (以下, RK) 法を適用した方法 (Velocity-Based Runge-Kutta Method, 以下, VBRK 法) を新たに定式化した. また, 系

の物体, 拘束条件, バネ・ダンパ等の属性を入力として, 4 次精度の VBRK (以下, VBRK4) 法を用いて系の拘束運動を自動計算するプログラム (以下, VBRK4Dyna) をプログラミング言語 C++ によって実装し, 研究用 DS へ適用して実用化の評価を実施した.

本論文では, 2 章で MBD におけるリアルタイム計算方法の検討, 3 章で MBD における VBRK 法の定式化, 4 章で VBRK4Dyna によるシミュレーションの評価について報告する.

2 MBD におけるリアルタイム計算方法の検討

近年の計算機の発達と共に, 拘束運動を高速に解く手法が多く提案され, 複雑な拘束運動を, リアルタイムかつ安定的に計算できるようになってきた. Stewart らの方法 (Implicit Time-Stepping Scheme, 以下, ITSS)^[1] は, 速度拘束式を満たすように拘束力を解き, かつ時間積分法にシンプレクティックオイラー法を用いた方法であり, 時間積分法は 1 次精度であるが, リアルタイム性, 安定性に優れているため, Open Dynamics Engine (以下, ODE)^[3], PhysX^[4], Havok^[5], Springhead^[6] 等の数多くのリアルタイム物理エンジンに採用されており, 最も普及している計算方法であるといえる. しかし, 車両運動モデルにおいて計算精度を求められる場合, ITSS の使用は, 時間積分による局所誤差が大きいため適さない.

VBRK 法は, ITSS に対し, 時間積分による局所誤差が少ない利点がある. ただし, 対象とする車両運動モデルの計算条件において, 拘束条件は各種ジョイント (球ジョイント, 回転ジョイント等), 接触対象は弾性体であるタイヤのみを前提とした. そのため, 拘束条件において, ITSS は拘

* マルチボディダイナミクスとは, 多数の部品で結合された機械システムの運動を解析するための理論である.

*1 DS : Driving Simulator.

*2 ITS : Intelligent Transport Systems.

*3 HILS : Hardware In the Loop Simulator.

*4 SILS : Software In the Loop Simulator.

束不等式を取り扱っているが、VBRK 法では、拘束等式のみを考慮した。また、研究用 DS におけるマルチボディ車両運動モデルのリアルタイム計算方法として、VBRK4 法の適用を検討した。VBRK4 法において、リアルタイムかつ安定的に計算可能な車両運動モデルの拘束条件数を決定するため、次の内容を実施した。

- (1) チェーンのシミュレーションを実施する事により、拘束条件数に対する 1 ステップ当りの平均計算時間を算出した。
- (2) 車両運動モデルにおいて、理論的な安定時間刻み幅は示されていないため、実際に車両運動モデルのシミュレーションを実施する事により、安定的に計算可能な時間刻み幅 (以下、安定時間刻み幅) を決定した。

各シミュレーションには VBRK4Dyna を利用している。これらのシミュレーションの評価については、4 章で説明する。

3 MBD における VBRK 法の定式化

3.1 基礎式

\mathbf{q} は多体系の一般化座標として、多体系の位置に関する拘束式は、次の式で表される。

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}) = \mathbf{0} \quad (1)$$

式 (1) を時間で微分することにより、次の速度拘束式が得られる。

$$\frac{d\mathbf{C}(\mathbf{q})}{dt} = \mathbf{C}_q(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (2)$$

ここで、

$$\mathbf{C}_q(\mathbf{q}) = \frac{\partial \mathbf{C}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}}$$

である。

拘束条件下のニュートン・オイラー方程式は次の式で表される。

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_q(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{F}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \quad (3)$$

ここで、

$$\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \text{diag}[\mathbf{M}_1 \cdots \mathbf{M}_l \cdots \mathbf{M}_n]$$

$$\mathbf{M}_l = \begin{bmatrix} m_l & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}_l \end{bmatrix}, \quad m_l = \text{diag}[m_l \ m_l \ m_l]$$

n は物体数、 m_l は質量、 \mathbf{J}_l は慣性テンソル、 $\boldsymbol{\lambda}$ はラグランジュの未定乗数、 \mathbf{F} は外力、トルク及びジャイロモーメントである。

3.2 時間離散化

式 (3)、 $\dot{\mathbf{q}}$ について、速度拘束式を満たすように拘束力を解き、かつ RK 法を適用するために、次のように時間離散化を行った。

$\ddot{\mathbf{q}}$ の離散化は、

$$\frac{\dot{\mathbf{q}}^{(l+1)} - \dot{\mathbf{q}}^n}{\Delta t^{(l)}} = \mathbf{K}^{(l)} + \mathbf{L}_a^{(l)} \quad (4)$$

$$\mathbf{K}^{(l)} = \mathbf{M}^{(l)-1} \left(\mathbf{F}^{(l)} - \mathbf{C}_q^{(l)T} \boldsymbol{\lambda}^{(l)} \right)$$

$$\mathbf{L}_a^{(l)} = \sum_{m=0}^l w_{lm} \mathbf{K}^{(m)} \quad (l = 0, \dots, s-1)$$

となる。ここで、 $\mathbf{M}^{(l)} = \mathbf{M}(\mathbf{q}^{(l)})$ 、 $\mathbf{C}_q^{(l)} = \mathbf{C}_q(\mathbf{q}^{(l)})$ 、 $\mathbf{F}^{(l)} = \mathbf{F}(\mathbf{q}^{(l)}, \dot{\mathbf{q}}^{(l)})$ 、 $\dot{\mathbf{q}}^{(0)} = \dot{\mathbf{q}}^n$ 、 $\dot{\mathbf{q}}^{(s)} = \dot{\mathbf{q}}^{n+1}$ 、 s は RK 法における段数である。上添え字 n は既知である時刻 t_n での値、上添え字 $n+1$ は Δt 秒後の時刻 t_{n+1} での値を意味する。係数 w_{lm} 及び $\Delta t^{(l)}$ は、適用する RK 法の公式によって決定される値である。RK 法は陽解法である事を前提としているため、 $m=l$ の時、 $w_{lm} = 0$ である。4 次精度の RK 法の場合、 w_{lm} 及び $\Delta t^{(l)}$ は、次のようになる。

$$w_{10} = w_{20} = w_{21} = 0, \quad w_{30} = 1, \quad w_{31} = 2, \quad w_{32} = 2$$

$$\Delta t^{(0)} = \Delta t^{(1)} = \frac{1}{2} \Delta t, \quad \Delta t^{(2)} = \Delta t, \quad \Delta t^{(3)} = \frac{1}{6} \Delta t$$

また、 $\dot{\mathbf{q}}$ の離散化は、

$$\frac{\mathbf{q}^{(l+1)} - \mathbf{q}^n}{\Delta t^{(l)}} = \dot{\mathbf{q}}^{(l)} + \mathbf{L}_v^{(l)} \quad (5)$$

$$\mathbf{L}_v^{(l)} = \sum_{m=0}^l w_{lm} \dot{\mathbf{q}}^{(m)} \quad (l = 0, \dots, s-1)$$

となる。ここで、 $\mathbf{q}^{(0)} = \mathbf{q}^n$ 、 $\mathbf{q}^{(s)} = \mathbf{q}^{n+1}$ である。

$\dot{\mathbf{q}}^{(l+1)}$ について、式 (2) を満たすようにし、さらに、式 (1) を満たすように修正すると、次のようになる。

$$\mathbf{C}_q^{(l)} \dot{\mathbf{q}}^{(l+1)} + \frac{\alpha}{\Delta t^{(l)}} \mathbf{C}^{(l)} = \mathbf{0} \quad (6)$$

ここで、 $\mathbf{C}^{(l)} = \mathbf{C}(\mathbf{q}^{(l)})$ である。 α は 0 ~ 1 の値をとり、ODE では、 $\alpha = 0.8$ を推奨している [3, 7]。

式 (4)、(6) より、 $\dot{\mathbf{q}}^{(l+1)}$ を消去すると、最終的に次のようになる。

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (7)$$

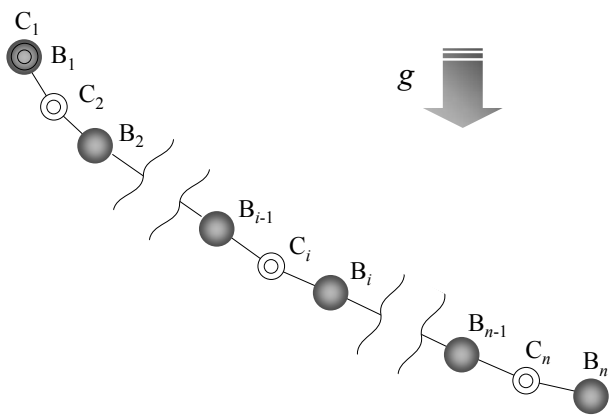
ここで、

$$\mathbf{A} = \mathbf{C}_q^{(l)} \mathbf{M}^{(l)-1} \mathbf{C}_q^{(l)T}$$

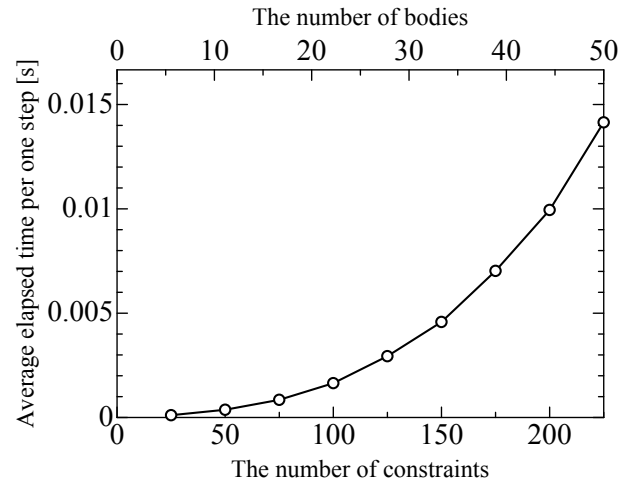
$$\mathbf{b} = \mathbf{C}_q^{(l)} \left(\dot{\mathbf{q}}^n + \Delta t^{(l)} \left(\mathbf{M}^{(l)-1} \mathbf{F}^{(l)} + \mathbf{L}^{(l)} \right) \right) + \frac{\alpha}{\Delta t^{(l)}} \mathbf{C}^{(l)}$$

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\lambda}^{(l)} \Delta t^{(l)}$$

である。式 (7) から \mathbf{x} を解き、式 (4) から $\dot{\mathbf{q}}^{(l+1)}$ を算出する事が出来る。 l が $s-1$ になるまで、繰り返し計算する事によって、 \mathbf{q}^{n+1} 、 $\dot{\mathbf{q}}^{n+1}$ を算出する事が出来る。



(a)



(b)

図1 チェーンのシミュレーション

(a) チェーンの力学モデル (B は物体, C は回転拘束を表す. 物体 1 の重心と絶対座標系の原点に回転拘束 1 を課し, 物体 $i-1$ ($i = 3, \dots, n$) の重心と物体 i の重心に回転拘束 i を課している事を表す). (b) 拘束条件数に対する 1 ステップ当りの平均計算時間

4 VBRK4Dyna によるシミュレーションの評価

使用した計算機は, 現在, 研究用 DS で標準に用いられているもので, 性能は, Core2 Quad 3GHz, 2GB RAM である. また, VBRK4Dyna は, 行列演算の際, 質量行列 M , 拘束ヤコビアン行列 C_q のスパース性を利用し, 非零成分のみを四則演算するようにしている.

4.1 チェーンのシミュレーションの計算負荷

VBRK4Dyna において, 拘束条件数に対する 1 ステップ当りの平均計算時間を求めるため, チェーンのシミュレーションを実施した. チェーンの力学モデルを図 1(a) に示す. 図 1(a) において, B は物体, C は回転拘束を表し, 物体 1 の重心と絶対座標系の原点に回転拘束 1 を課し, 物体 $i-1$ ($i = 3, \dots, n$) の重心と物体 i の重心に回転拘束 i を課している事を表す.

拘束条件数に対する 1 ステップ当りの平均計算時間を図 1(b) に示す. 安定時間刻み幅が分かれば, 図 1(b) から, リアルタイムに計算可能な最大拘束条件数が決定できる. 安定時間刻み幅は, 独立懸架式サスペンションを有する車両運動モデルのシミュレーションを実施する事により決定したので, 次節で説明する.

4.2 独立懸架式サスペンションを有する車両運動モデルのシミュレーション

(1) 計算対象のモデルの内容

独立懸架式であるスイングアーム式サスペンションを有する, 物体数 15, 拘束条件数 76, 自由度 14 の車両運動モ

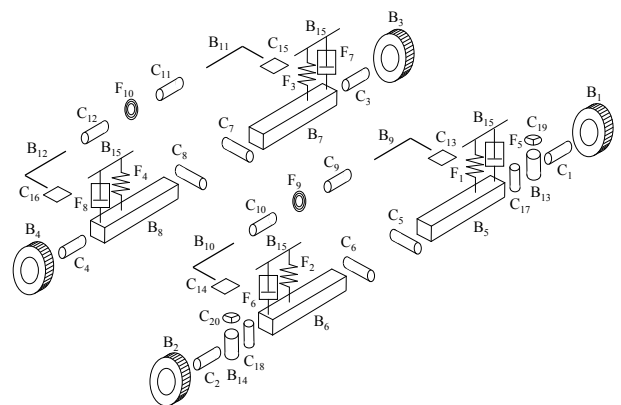


図2 Sモデル (Sモデルは, スイングアーム式サスペンションを有する, 物体数 15, 拘束条件数 76, 自由度 14 の車両運動モデルである. B は物体, C は拘束条件, F はバネ及びダンパ, 下付き添え字は識別番号 (ID) を表す)

デル (以下, Sモデル) のシミュレーションを実施した. Sモデルを図 2 に示す. B は物体, C は拘束条件, F はバネ及びダンパ, 下付き添え字は識別番号 (以下, ID) を表す. Sモデルにおける主な車両諸元を表 1 に示す. 図 2 における詳細な属性については, 付録に示した. 各属性を設定する際, 文献 [8] を参考にした. タイヤモデルにおいて, 前後, 横方向はマジックフォーミュラモデル [9], 垂直方向は, 線形バネ・ダンパモデルを適用した. 垂直方向のバネ定数は $200000[\text{N/m}]$, 減衰係数は $1000[\text{N}\cdot\text{s/m}]$ とした.

(2) 計算の安定性及びリアルタイム性

安定とする条件を, 計算が不安定になりやすい高速域

表 1 S モデルにおける主な車両諸元

| Item | Specifications |
|--|----------------|
| Total mass[kg] | 1592.19 |
| Moment of inertia (z) [kg·m ²] | 1452.84 |
| Center of mass height [m] | 0.65 |
| Wheelbase [m] | 2.77 |
| Front tread [m] | 1.48 |
| Rear tread [m] | 1.46 |

である時速 150[km/h] での自由走行時に数値的な発散をしない事、ブレーキング時に車体速度が 0 に収束する事として評価した。この結果、1/300[s] 以下の時間刻み幅で安定的に計算可能である事が分かった。図 1(b) から S モデルの拘束条件数である 76 における平均計算時間を見ると、約 0.001[s] であり、シミュレーション上の経過時間がグラフィックス更新周期 (1/60[s]) になるようにするには、1/300[s] の時間刻み幅で 5 ステップ分の計算が必要であり、グラフィックス更新周期当りの平均計算時間は約 0.005[s] となる。そのため、S モデルのシミュレーションは、リアルタイム性 (1/60[s] 以内に計算出来る事) を十分に満たしている事が分かる。なお、計測した S モデルにおける平均計算時間は、0.0043[s] となり、リアルタイム性を満たしている事を確認している。以上の結果より、拘束条件数 76 以下における独立懸架式サスペンションを有する車両運動モデルのリアルタイムかつ安定的なシミュレーションが可能である事が分かった。

(3) 車両特性

S モデルの車両特性を評価した。実施したシミュレーションは以下のとおりである。

- (a) 旋回半径 30[m] における各速度の定常円旋回。
- (b) 半径 0.05[m] の球体の障害物が配置された走行路における、10[km/h] での直進走行 (障害物のレイアウトを図 3(a) に示す)。

時間刻み幅は 1/300[s] とした。

項目 (a) の S モデルにおける定常円旋回時のロール角を図 4 に示す。ロール率 (横加速度が 0.5g[m/s²] 時のロール角) は、4.2[deg] となり、実際の一般的な車両より高い値となった [10, 11]。

項目 (b) の S モデルにおけるバネ上質量及び各タイヤの重心高さの時系列情報を図 3(b) に示す。各タイヤは、障害物に衝突した時に、高さ方向に移動しており、独立に運動している事が分かる。また、各タイヤが障害物に衝突した時に、バネ上質量の重心高さのステップ上の変化がない事や、0 ~ 5 秒間における各タイヤの最大振幅とバネ上質量の最大振幅の比が約 30% である事から、バネ上質量の振動の低減効果が確認できる。

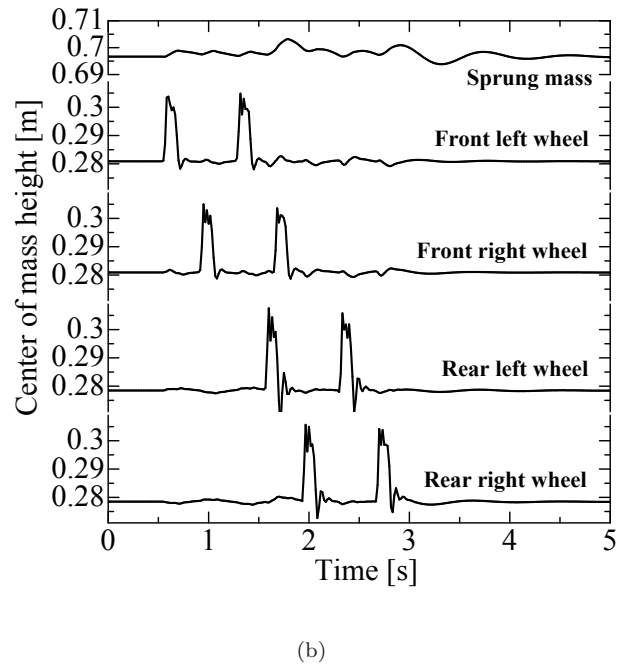
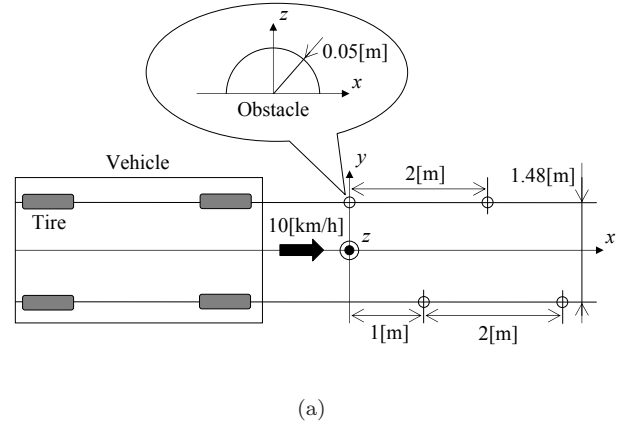


図 3 S モデルにおける障害物上の直進走行

(a) 障害物のレイアウト。(b) S モデルにおけるバネ上質量及び各タイヤの重心高さの時系列情報

5 むすび

マルチボディダイナミクス (以下, MBD) において、速度拘束式を満たすように拘束力を解き、かつ時間積分法に高精度の陽的ルンゲクッタ法を適法した方法 (以下, VBRK 法) による車両運動モデルのリアルタイムシミュレーションを実施した。また、系の物体、拘束条件、バネ・ダンパ等の属性を入力として、4 次精度の VBRK 法を用いて系の拘束運動を自動計算するプログラム (以下, VBRK4Dyna) を実装した。本開発の成果は以下のとおりである。

- (1) MBD における VBRK 法を定式化した。
- (2) 研究用 DS 環境における VBRK4Dyna の拘束条件数に

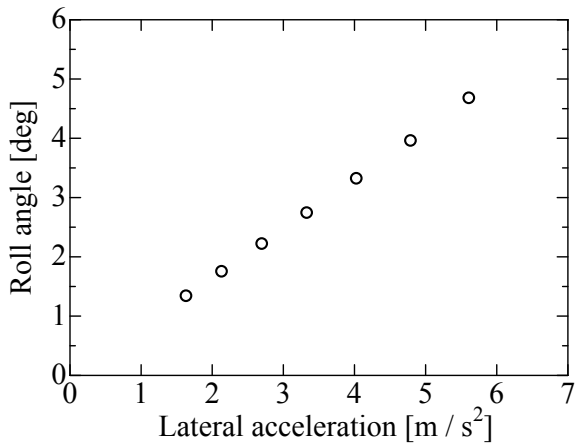


図4 Sモデルにおける定常円旋回時のロール角

対する1ステップ当りの平均計算時間を示した。

- (3) 研究用 DS 環境において、VBRK4Dyna による拘束条件数 76 以下の独立懸架式サスペンションを有する車両運動モデルのリアルタイムかつ安定的なシミュレーションが可能である事を示した。

今後、構築した車両運動モデルが妥当な車両特性である事を十分に検討した上、研究用 DS への組み込みを実施予定である。また、計算の速度、精度について、さらなる改善に努めていきたい。

参考文献

- [1] D.E.Stewart and J.C.Trinkle, "An Implicit Time-Stepping Scheme for Rigid Body Dynamics with Inelastic Collisions and Coulomb Friction," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol.39, No.15, pp.2673-2691, 1996.
- [2] 北島章雄, 戸田祐毅, "日本自動車研究所殿向け全方位視野ドライビングシミュレータ," 三菱プレジジョン技報, Vol.5, pp.1-6, 2010.
- [3] R.Smith, "http://opende.sourceforge.net/," 2007.
- [4] NVIDIA, "http://developer.nvidia.com/object-physics.html," 2009.
- [5] Havok, "http://www.havok.com/," 2010.
- [6] 長谷川晶一他, "http://springhead.info/," 2007.
- [7] K.Erleben, "Stable, Robust, and Versatile Multibody Dynamics Animation," Ph.D Thesis University of Copenhagen, 2005.
- [8] M.Blundell,D.Harty, "The Multibody Systems Approach to Vehicle Dynamics," Butterworth-Heinemann, 2004.
- [9] Hans B.Pacejka, "Tyre and Vehicle Dynamics,"

付表2 回転拘束の属性

| ID | Connected body ID | Rotation axis | | | Rotation point [m] | | |
|----|-------------------|---------------|---|---|--------------------|-------|------|
| | | x | y | z | x | y | z |
| 1 | 1,13 | 0 | 1 | 0 | 2.77 | 0.74 | 0.3 |
| 2 | 2,14 | 0 | 1 | 0 | 2.77 | -0.74 | 0.3 |
| 3 | 3,7 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0.73 | 0.3 |
| 4 | 4,8 | 0 | 1 | 0 | 0 | -0.73 | 0.3 |
| 5 | 5,15 | 1 | 0 | 0 | 2.77 | 0.1 | 0.3 |
| 6 | 6,15 | 1 | 0 | 0 | 2.77 | 0.1 | 0.3 |
| 7 | 7,15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.3 |
| 8 | 8,15 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0.3 |
| 9 | 9,15 | 0 | 1 | 0 | 2.47 | 0.26 | 0.22 |
| 10 | 10,15 | 0 | 1 | 0 | 2.47 | -0.26 | 0.22 |
| 11 | 11,15 | 0 | 1 | 0 | -0.41 | 0.5 | 0.4 |
| 12 | 12,15 | 0 | 1 | 0 | -0.41 | -0.5 | 0.4 |
| 17 | 5,13 | 0 | 0 | 1 | 2.77 | 0.74 | 0.3 |
| 18 | 6,14 | 0 | 0 | 1 | 2.77 | -0.74 | 0.3 |

付表3 平面内拘束の属性

| ID | Connected body ID | Normal axis | | | Fixed point on plane [m] | | |
|----|-------------------|-------------|---|---|--------------------------|-------|-----|
| | | x | y | z | x | y | z |
| 13 | 5,9 | 0 | 0 | 1 | 2.77 | 0.74 | 0.3 |
| 14 | 6,10 | 0 | 0 | 1 | 2.77 | -0.74 | 0.3 |
| 15 | 7,11 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0.73 | 0.3 |
| 16 | 8,12 | 0 | 0 | 1 | 0 | -0.73 | 0.3 |

付表4 回転駆動拘束の属性

| ID | Connected body ID | Rotation axis | | |
|----|-------------------|---------------|---|---|
| | | x | y | z |
| 19 | 5,13 | 0 | 0 | 1 |
| 20 | 6,14 | 0 | 0 | 1 |

Butterworth-Heinemann, 2006.

- [10] 景山克三, 景山一郎, "自動車力学," 理工図書, p163, 1984.
- [11] 原田宏, "自動車技術者のためのビークルダイナミクス," 産業科学システムズ, p18, 2005.

付録

Sモデルの詳細な属性について示す。物体の属性を付表1に示す。物体の属性は、質量、慣性モーメント、重心座標、オイラー角となる。座標系は右手系であり、オイラー角は、 z 軸周りに ϕ [deg]、 x 軸周りに θ [deg]、 z 軸周りに ψ [deg]の順で回転するものとした。回転拘束の属性を付表2、平面内拘束の属性を付表3、駆動歯車拘束の属性を付表4、並進バネの属性を付表5、並進ダンパの属性を付表6、回転バネの属性を付表7に示す。各拘束、バネ、ダンパの属性には共通して、接続された物体IDを持つ。回転拘束は回転軸の方向及び回転支点座標、平面内拘束は平面に垂直な軸及び平面内の点座標、回転駆動拘束は回転軸の方向及びギア比、並進バネは弾性定数、自然長及び各物体の接続点座標、並進ダンパは減衰係数及び各物体の接続点座標、回転バネは弾性定数及び回転軸の方向を属性に持つ。

付表 1 物体の属性

| ID | Name | Mass [kg] | Moment of inertia [kg·m ²] | | | Coordinates [m] | | | Euler angles [deg] | | |
|----|----------------------|-----------|--|----------|----------|-----------------|----------|----------|--------------------|----------|--------|
| | | | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> | ϕ | θ | ψ |
| 1 | Front left wheel | 21.2 | 0.58 | 0.58 | 0.93 | 2.77 | 0.74 | 0.3 | 0 | 90 | 0 |
| 2 | Front right wheel | 21.2 | 0.58 | 0.58 | 0.93 | 2.77 | -0.74 | 0.3 | 0 | 90 | 0 |
| 3 | Rear left wheel | 21.2 | 0.58 | 0.58 | 0.93 | 0 | 0.73 | 0.3 | 0 | 90 | 0 |
| 4 | Rear right wheel | 21.2 | 0.58 | 0.58 | 0.93 | 0 | -0.73 | 0.3 | 0 | 90 | 0 |
| 5 | Front left arm | 15.4 | 0.09 | 0.16 | 0.1 | 2.77 | 0.5 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | Front right arm | 15.4 | 0.09 | 0.16 | 0.1 | 2.77 | -0.5 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | Rear left arm | 23.8 | 0.3 | 0.4 | 0.35 | 0 | 0.5 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | Rear right arm | 23.8 | 0.3 | 0.4 | 0.35 | 0 | -0.5 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | Front left roll bar | 1.4 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 2.47 | 0.26 | 0.22 | 0 | 90 | 0 |
| 10 | Front right roll bar | 1.4 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | 2.47 | -0.26 | 0.22 | 0 | 90 | 0 |
| 11 | Rear left roll bar | 1.4 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | -0.41 | 0.51 | 0.4 | 0 | 90 | 0 |
| 12 | Rear right roll bar | 1.4 | 0.01 | 0.01 | 0.02 | -0.41 | -0.51 | 0.4 | 0 | 90 | 0 |
| 13 | Right wheel knuckle | 11.7 | 0.07 | 0.12 | 0.08 | 2.77 | 0.74 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | Left wheel knuckle | 11.7 | 0.07 | 0.12 | 0.08 | 2.77 | -0.74 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | Sprung mass | 1400 | 200 | 1000 | 1000 | 1.33 | 0 | 0.73 | 0 | 0 | 0 |

付表 5 並進バネの属性

| ID | Connected body ID | Stiffness [N/m] | Natural length [m] | Connected point[m] | | |
|----|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | | <i>x</i> ₁ | <i>y</i> ₁ | <i>z</i> ₁ |
| 1 | 5,15 | 32000 | 0.43 | 2.79 | 0.48 | 0.73 |
| | | | | 2.78 | 0.55 | 0.48 |
| 2 | 6,15 | 32000 | 0.43 | 2.79 | -0.48 | 0.73 |
| | | | | 2.78 | -0.55 | 0.48 |
| 3 | 7,15 | 61000 | 0.25 | -0.01 | 0.48 | 0.4 |
| | | | | -0.01 | 0.5 | 0.22 |
| 4 | 8,15 | 61000 | 0.25 | -0.01 | -0.48 | 0.4 |
| | | | | -0.01 | -0.5 | 0.22 |

付表 6 並進ダンパの属性

| ID | Connected body ID | Damping factor [N·s/m] | Connected point[m] | | |
|----|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | | <i>x</i> ₁ | <i>y</i> ₁ | <i>z</i> ₁ |
| 5 | 5,15 | 2000 | 2.79 | 0.48 | 0.73 |
| | | | 2.78 | 0.55 | 0.22 |
| 6 | 6,15 | 2000 | 2.79 | -0.48 | 0.73 |
| | | | 2.78 | -0.55 | 0.22 |
| 7 | 7,15 | 1000 | 0.04 | 0.5 | 0.85 |
| | | | 0 | 0.62 | 0.33 |
| 8 | 8,15 | 1000 | 0.04 | -0.5 | 0.85 |
| | | | 0 | -0.62 | 0.33 |

付表 7 回転バネの属性

| ID | Connected body ID | Stiffness [N·m/rad] | Rotation axis | | |
|----|-------------------|---------------------|---------------|----------|----------|
| | | | <i>x</i> | <i>y</i> | <i>z</i> |
| 9 | 9,10 | 500 | 0 | 1 | 0 |
| 10 | 11,12 | 600 | 0 | 1 | 0 |

[執筆者紹介]



佐々布 直明 略歴

2008 年入社．各種シミュレータのソフトウェア設計に従事．現在，シミュレーション・システム第一部システム開発課



伊藤 広明 略歴

1989 年入社．各種シミュレータのソフトウェア設計，システム設計に従事．現在，シミュレーション・システム第二部自動車システム課



大貫 正明 略歴

1986 年入社．各種シミュレータのシステム設計に従事．現在，シミュレーション・システム第二部自動車システム課

回転翼機の汎用シミュレーション技術

清水 昭彦, 栗原 佳一

要旨： 回転翼機の機体運動に関する汎用シミュレーション技術を紹介する。過去に製造した回転翼機のフライト・シミュレータでは、汎用性の低い DVA* と呼ばれる方式を用いたロータ空力モデルが使われることが多かった。近年、基本操縦訓練向けのものでは、翼素理論を用いて直接計算する方式の汎用性の高いロータ空力モデルを採用している。一方胴体及び尾翼の空力モデルでは、固定翼機と同じ一般的な手法が用いられている。空力モデル以外では、地面反力及びセットリング・ウィズ・パワーの汎用シミュレーション方法について紹介する。

1 まえがき

基本操縦訓練向け回転翼機に採用した機体運動に関する汎用シミュレーション技術を紹介する。模擬対象機によってソフトウェアの大幅な改修を必要としない汎用シミュレーション技術は、ソフトウェアの製造効率改善及び品質向上に効果がある。本稿ではまずフライト・シミュレータの機体運動モデルについて一般的な事項を述べ、次に回転翼機の機体運動に最も影響するロータ空力モデルの汎用化について解説後、胴体及び尾翼（水平尾翼及び垂直尾翼）の空力モデルについて言及する。また、着陸等の地上運動に必要な地面反力及びヘリコプターの事故原因にもなっているセットリング・ウィズ・パワーの汎用シミュレーション方法も紹介する。

2 フライト・シミュレータの機体運動モデル

2.1 運動方程式

航空機を剛体と考えたときの機体固定座標系における一般的な運動方程式を式 (1) ~ 式 (6) に示す [1]。

$$\dot{U} = (Fx_a + Fx_g)/m - g \sin \Theta + VR - WQ \quad (1)$$

$$\dot{V} = (Fy_a + Fy_g)/m + g \cos \Theta \sin \Phi + WP - UR \quad (2)$$

$$\dot{W} = (Fz_a + Fz_g)/m + g \cos \Theta \cos \Phi + UQ - VP \quad (3)$$

$$\dot{P} = (Mx_a + Mx_g + (I_{yy} - I_{zz})QR + I_{xz}(R + PQ))/I_{xx} \quad (4)$$

$$\dot{Q} = (My_a + My_g + (I_{zz} - I_{xx})PR + I_{xz}(RR - PP))/I_{yy} \quad (5)$$

$$\dot{R} = (Mz_a + Mz_g + (I_{xx} - I_{yy})PQ + I_{xz}(P - QR))/I_{zz} \quad (6)$$

ここで、 U, V, W は速度の各座標系成分、 P, Q, R は角速度の各座標系成分、 m は質量、 I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} は各軸に関する慣性能率、 I_{xz} は XZ 面に関する慣性乗積、 g は重力加速度、 Θ, Φ はオイラー角、 Fx, Fy, Fz は外力の各座標系成分、 Mx, My, Mz は外力モーメントの各座標系成分、添え字の a は空気力 (推力を含む)、添え字の g は地面反力を示す。フライト・シミュレータの機体運動モデルでは、回転翼機及び固定翼機共に式 (1) ~ 式 (6) の運動方程式を用いる。入力項 (外力項) の中で、模擬対象機の飛行性能及び特性を最も表現できる部分は空気力である。回転翼機の特徴は、空気力の各成分としてメイン・ロータ及びテール・ロータの発生する空気力があることであり、これは固定翼機のエンジン推力及び主翼等の発生する空気力に相当する。

2.2 回転翼機のロータ空力モデル

飛行中の回転翼機の機体に作用する空気力の大半は、ロータの発生する空気力であり、パイロットの操舵は縦及び横のサイクリック・ピッチ角 (ブレードの回転角度の関数で周期的に変化するブレード・ピッチ角) 及びコレクティブ・ピッチ角 (ブレードの回転角度に依存しないブレード・ピッチ角) としてロータ・システムに入力される。したがって、ロータ空力モデルは機体運動モデルの中で最も重要である。フライト・シミュレータではリアルタイム性が要求されるため、過去に当社で製造したシミュレータでは、計算負荷の少ない DVA と呼ばれる手法を用いたロータ空力モデルが使われることが多かったが汎用性が乏しい。現在当社製シミュレータでは計算機の性能向上に伴い、汎用性の高い翼素理論を用いたロータ空力モデルが主流となっている。

(1) DVA(Direct Vector Approach) 方式

DVA 方式は、シーソー型ロータ又は関節型ロータの機体を模擬するシミュレータで多く採用され、計算機の性能が低い時代に用いられた低負荷な方式である。DVA 方式の原理を式 (7) ~ 式 (12) に示す。なお、メイン・ロータ及びテール

* DVA:Direct Vector Approach

ル・ロータの表記上の区別は省略する。

$$C_H = f_{TABLE1}(\mu, \lambda, \theta_{75}) \quad (7)$$

$$C_Y = f_{TABLE2}(\mu, \lambda, \theta_{75}) \quad (8)$$

$$C_T = f_{TABLE3}(\mu, \lambda, \theta_{75}) \quad (9)$$

$$C_Q = f_{TABLE4}(\mu, \lambda, \theta_{75}) \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} Fx_s \\ Fy_s \\ Fz_s \end{bmatrix} = \mathbf{Ecs} \begin{bmatrix} C_H \\ C_Y \\ C_T \end{bmatrix} \rho\pi R^2 (\Omega R)^2 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} Mx_s \\ My_s \\ Mz_s \end{bmatrix} = \mathbf{Ecs} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_Q \end{bmatrix} \rho\pi R^2 (\Omega R)^2 R \quad (12)$$

ここで、 C_H, C_Y, C_T 及び C_Q はそれぞれコントロール軸系におけるロータの抵抗係数、横力係数、推力係数及びトルク係数、 Fx_s, Fy_s, Fz_s はシャフト軸系におけるロータの3分力、 Mx_s, My_s, Mz_s はシャフト軸系におけるロータの3分力モーメント、 μ はチップ・スピード・レシオ、 λ はインフロー・レシオ、 θ_{75} はブレードのスパン方向 75% 位置のコレクティブ・ピッチ角、 \mathbf{Ecs} はコントロール軸系からシャフト軸系への変換マトリックス、 ρ は空気密度、 R はロータ半径、 Ω はロータ回転角速度を示す。式 (7) ~ 式 (10) に示すように、DVA はあらかじめ用意した 3 次元の関数テーブル $f_{TABLE1} \sim f_{TABLE4}$ から線形補間によりロータ空力係数を求める方式である。したがって模擬対象機が変わると $f_{TABLE1} \sim f_{TABLE4}$ を作成し直す必要がある。式 (11) 及び式 (12) では各テーブルから得られた空力係数を有次元化すると共に、縦及び横のサイクリック・ピッチ角から決定される \mathbf{Ecs} マトリックスによりシャフト軸系に変換する。この変換は厳密にはフラッピングも関係するが、計算上無視していることと、式 (12) に示すようにコントロール軸系における X 軸及び Y 軸に関するモーメント係数を 0 としていることが、DVA が大きなコントロール・モーメントを発生する無関節型ロータのシミュレーションには適さないことを示している。

(2) 翼素理論により直接計算する方式

翼素理論の考え方を説明するため、図 1 にブレード上の翼素を示す。 ψ はブレード回転角度、 Ω はブレード回転角速度を示す。この方式ではまず、ブレードのスパン方向位置 r の分割した翼素 dr に働く空気力を求め、それをスパン方向に積分してブレード全体に働く空気力を求め、さらにブレードの回転方向に積分して回転翼全体としての空気力を求める。これを b 枚ブレードのロータの発生する推力 T を例にとって表すと式 (13) となる [2]。

$$T = \frac{b}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{dT}{dr} dr d\psi \quad (13)$$

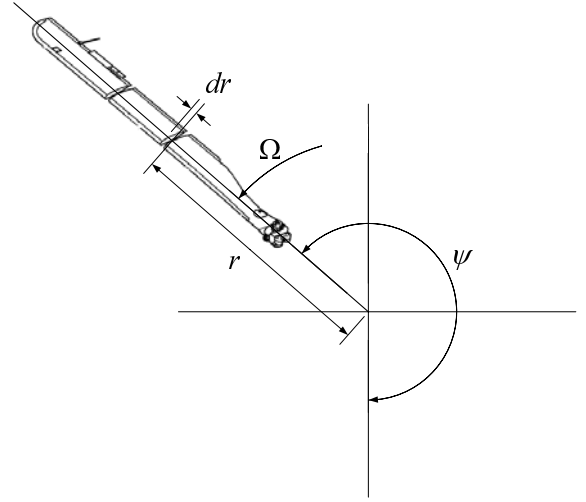


図 1 ブレード上の翼素

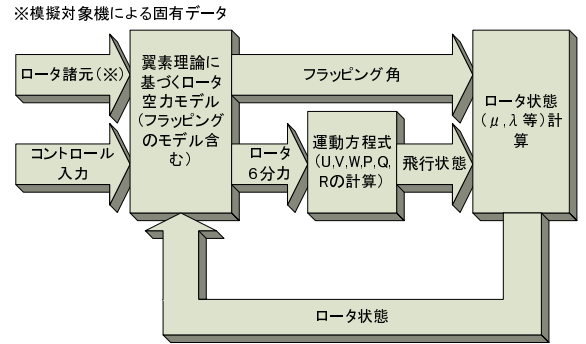


図 2 汎用ロータ空力モデルの計算ブロック図

ここで、 R はロータ半径、 dT は翼素に働く推力を示す。このように翼素理論に基づいた式がロータ 6 分力について存在する。以上 6 本の式を解析的に解いたモデルを実時間で計算する方式が、翼素理論により直接計算する方式として半関節型ロータ又は無関節型ロータの機体を模擬するシミュレータに採用されている。ただし、DVA 及び翼素理論共にブレードの揚力傾斜は一定としているので、ブレードの失速などは模擬できない。

3 ロータ空力モデルの汎用化

前述の理由から DVA は汎用モデルには適さない。ここでは翼素理論により直接計算する方式の汎用化について述べる。表 1 に示すように、翼素理論ではロータ諸元、コントロール入力及びロータ状態に区分されるデータが入力となり、ロータ 6 分力を計算している [3]。この入力データの中で、模擬対象機固有のデータはロータ諸元に区分される 9 個のデータである。ロータ空力モデルの汎用化は、この 9 個のデータを任意に設定できるようにすることで実現した。汎用ロータ空力モデルの計算ブロック図を図 2 に示す。ロー

表 1 翼素理論モデルの入力データ

| 番号 | 入力データ | 記号 | 区分 |
|----|------------------|------------------------|--------------|
| 1 | ブレード枚数 | b | ロータ緒元 |
| 2 | ブレード翼弦長 | c | |
| 3 | ロータ半径 | R | |
| 4 | ブレード 2 次元揚力傾斜 | a | |
| 5 | ブレード 2 次元抗力係数 | C_{d0} | |
| 6 | 翼端損失因子 | B | |
| 7 | フラッピング・ヒンジ・オフセット | χ_β | コントロール 入力 |
| 8 | フラッピング・ヒンジばね定数 | κ_β | |
| 9 | フラッピング・ヒンジ減衰係数 | $\kappa_{\dot{\beta}}$ | |
| 10 | コレクティブ・ピッチ角 | θ_0 | ロータ状態 |
| 11 | 縦サイクリック・ピッチ角 | θ_s | |
| 12 | 横サイクリック・ピッチ角 | θ_c | |
| 13 | チップ・スピード・レシオ | μ | |
| 14 | インフロー・レシオ | λ | |
| 15 | ロータ回転数 | Ω | |
| 16 | ハブ位置ピッチ角速度 | q_r | |
| 17 | ハブ位置ロール角速度 | p_r | |
| 18 | コーニング角 | β_0 | |
| 19 | 縦フラッピング角 | β_c | |
| 20 | 横フラッピング角 | β_s | |

タ諸元以外の計算ブロックは、一度確立すれば模擬対象機によって変更する必要はない。

4 胴体及び尾翼の空力モデル

胴体及び尾翼（水平尾翼及び垂直尾翼）の空力モデルは、固定翼機のシミュレーションで使われているモデルと基本的に同じ形であり、前述のロータ空力モデルのように汎用化されたモデルは用いていない。基本的な考え方を式 (14)～式 (17) に示す。モーメントに関する表記は省略する。

$$Fxs_{[SECTION]} = \frac{1}{2} \rho V_{local}^2 C_x(\alpha_{local}, \beta) S_{[SECTION]} \quad (14)$$

$$Fys_{[SECTION]} = \frac{1}{2} \rho V_{local}^2 C_y(\alpha_{local}, \beta) S_{[SECTION]} \quad (15)$$

$$Fzs_{[SECTION]} = \frac{1}{2} \rho V_{local}^2 C_z(\alpha_{local}, \beta) S_{[SECTION]} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} Fxb_{[SECTION]} \\ Fyb_{[SECTION]} \\ Fzb_{[SECTION]} \end{bmatrix} = \mathbf{Esb} \begin{bmatrix} Fxs_{[SECTION]} \\ Fys_{[SECTION]} \\ Fzs_{[SECTION]} \end{bmatrix} \quad (17)$$

ここで Fxs , Fys , Fzs は空気力の安定軸系成分, Fxb , Fyb , Fzb は空気力の機体軸系成分, ρ は空気密度, V_{local} は局所速度, α_{local} は局所迎角, β は横滑り角, S は面積, \mathbf{Esb} は安定軸系から機体軸系への変換マトリックス, 添え字の $[SECTION]$ は胴体, 水平尾翼及び垂直尾翼の機体部位を示す。式 (14)～式 (16) に示すように、あらかじめ用意した 2

次元の関数テーブル C_x, C_y, C_z から線形補間により各部位の空力係数を求め、最終的に機体軸系の力及びモーメントを計算する方式である。局所的な V と α を用いているのは、ロータの吹き下ろしの影響を考慮するためである。

5 汎用地面反力モデル

スキッド式降着装置の回転翼機の汎用地面反力モデルを図 3 に示す。左右スキッドの前部及び後部, テール・スキッドのあるタイプではテール部分の機体に固定したバネ・ダンパ系で構成する。3 点車輪式降着装置の場合は主輪及び尾輪の構成とし、尾輪にはキャスター機能が付加される。これらのバネ・ダンパ系の発生する力とそれぞれの作用点のアーム長から、地面反力の 6 分力を計算する。模擬対象機固有のデータは作用点のアーム長及び各バネ・ダンパ系のセッティングである。スキッド式のバネ・ダンパ系は車輪式に比較してバネを固く摩擦係数の大きなセッティングとする。

6 セットリング・ウィズ・パワーのシミュレーション

セットリング・ウィズ・パワーはしばしば回転翼機の事故原因にもなっているため、フライト・シミュレータでもその模擬に対する要求は多いが、その現象はボルテックス・リングと呼ばれる不規則な渦のため前述の翼素理論では解けない。したがって、推定や経験則によりシミュレーションする方法をとっている。当社製造のシミュレータで用いられているセットリング・ウィズ・パワーの計算フローを図 4 に示す。

ここで、 v_0 はホバリング時の吹き下ろし, V_x は前進速度, V_z は降下率, $x_1 \sim x_3$ は設定用データでシミュレータによって異なる。 x_1 は降下率に関する第 1 段階エン트리条件の 0 に近い側の設定用データで、第 1 段階への入りやすさを調整する。 x_2 は前進速度に関する第 1 段階エン트리条件の設定用データで、同じく第 1 段階への入りやすさを調整する。 x_3 はセットリング・ウィズ・パワーからの回復条件のうち前進速度に関する調整用データで、回復しやすさを調整する。この計算フローから分かるように、この方法は実機どおりの特性をシミュレーションするものではなく、セットリング・ウィズ・パワーの兆候及び対処方法を体験させることを前提としたものである。

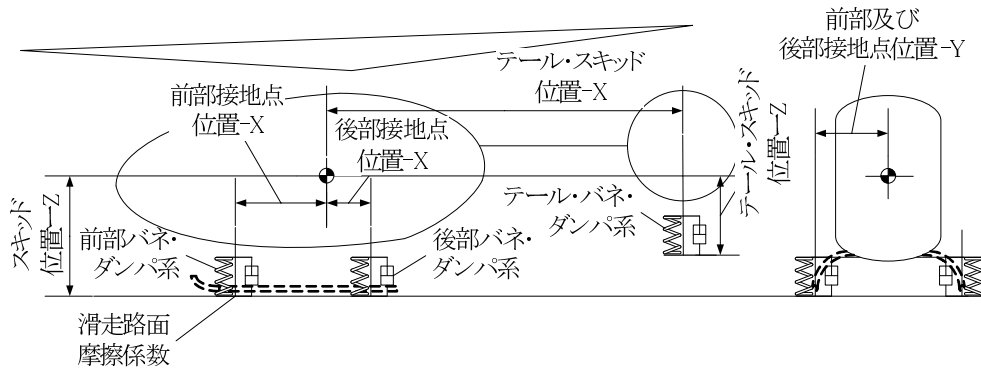


図3 汎用地面反力モデル

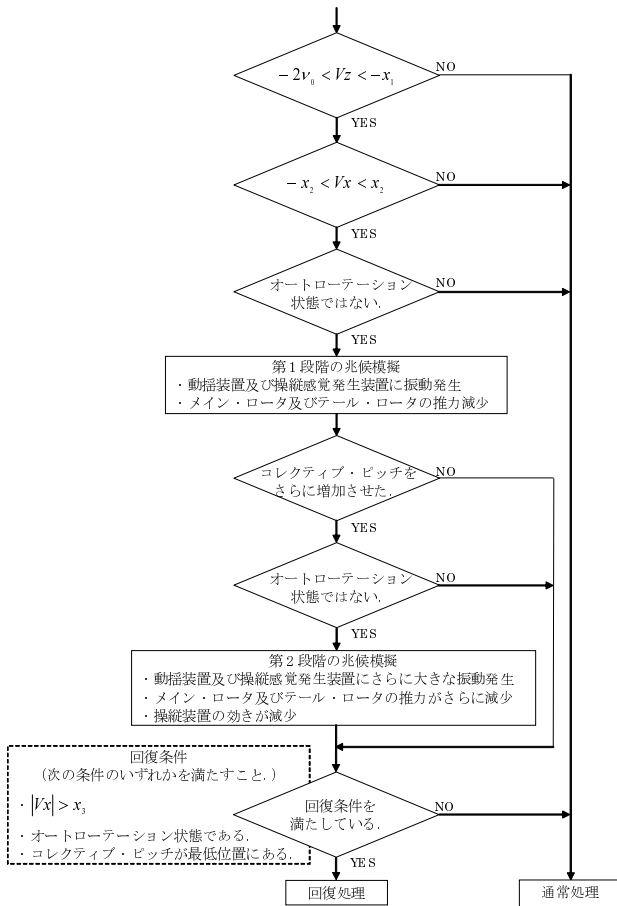


図4 セットリング・ウィズ・パワーの計算フロー



図5 回転翼フライト・シミュレータのコックピット

度はフライト・シミュレータとしては不十分である。回転翼機の胴体及び尾翼の空力モデルについては、固定翼機のものよりも汎用化しやすいと思われるが、今後固定翼機の空力モデルの汎用化と合わせて実現を目指したい。

参考文献

- [1] 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研治, “航空機力学入門,” 東京大学出版会, 1982.
- [2] 加藤寛一郎, 今永勇生, “ヘリコプタ入門,” 東京大学出版会, 1985.
- [3] 東 昭, “航空工学 (I)(II),” 東京装華房, 1989.
- [4] “THE USAF STABILITY AND CONTROL DATCOM Users Manual,” McDonnell Douglas Astronautics Company, 1979.

7 むすび

本技術を適用して 2009 年度に納入した回転翼フライト・シミュレータのコックピットを図5に示す。

ロータ空力モデルが翼素理論を用いて汎用化できるのは、ブレードの形状が比較的単純であることと、回転翼機の高度的及び速度的な飛行領域が狭いためである。固定翼機ではこう簡単に汎用化できない。固定翼機の空力モデルの汎用化(空力微係数の推算)では, USAF STABILITY AND CONTROL DATCOM[4]がよく知られているが、その精

[執筆者紹介]



清水 昭彦 略歴

1986年入社,主にフライト・シミュレータの飛行性能及び特性プログラムの開発に従事,現在,シミュレーションシステム第一部防衛システム課



栗原 佳一 略歴

2006年入社,主にフライト・シミュレータのソフトウェア設計及び製造に従事,現在,シミュレーション技術部 ソフトウェア技術課

P-3C 戦術訓練装置の概要と有効性，及び運用支援について

林 勇己，新井昌彦

要旨： 海上自衛隊に配備されている P-3C 哨戒機部隊には，同機専用の戦術訓練装置がある．本稿では，この訓練装置の概要と訓練で模擬できる機能とその有効性，および本装置を用いた訓練に対する運用支援の内容について述べる．

1 まえがき

四方を海で囲まれたわが国においては，海洋からの脅威に対し昼夜を問わぬ監視や，行動抑止行為は専守防衛の必須任務である．その任務の最前線で活躍している P-3C 哨戒機は，搭乗員の緻密な連携により重要な任務を遂行しており，各搭乗員が担当する高度な電子機器の操作には卓越した技能と連携が要求され，日々の訓練が不可欠になっている．本論文では，第 2 章で，この訓練に供される戦術訓練装置（Operational Flight Tactical Trainer 以下 OFTT と称す）の概要を，第 3 章で OFTT の有効性を，第 4 章で訓練に必須の運用支援の内容について述べる．

2 OFTT 概要

本装置は，三菱プレジジョン株式会社（以下当社と称す）が，平成 5 年までに海上自衛隊殿向けに 3 式納入し，対潜戦術に関する搭乗員全体の技量の修得と練度の維持向上を目的とした訓練装置である．表 1 に P-3C 哨戒機搭乗員の役割を示す．このように，多種の役割を担う搭乗員から構成されている．搭乗員が行う訓練には，各員の技量修得・維持とは別に，監視・搜索・追尾・物量投下・魚雷投下・機雷敷設・対艦攻撃などの状況に即した訓練を搭乗員全員で実施するチーム訓練がある．特に潜水艦を目標とした搜索・追尾・攻撃を行なう対潜戦は，搭乗員が主体となって戦術を進めていくため，訓練の重要度が高く完成度も要求される．また，訓練では搭乗員の個別技量のほかにチームとしての相互連携が任務の成果に大きく影響するため，コミュニケーション技術の向上が必要となる．OFTT は通常の飛行訓練装置とは異なり，戦術飛行に必要な計器類や操縦装置は最小限に簡略化されている．図 1 に OFTT の外観配置を，表 2 に OFTT 各部の機能概要を示す．主に戦術航空士から第 3 対潜員までの担当機器を実機同様に模擬した戦術訓練部（通称：dog house）と，目標設定や飛行・訓練環境条件を制御する「指導部」，装置全体の信号を処理する「計算処理部」，訓練の状況をリアルタイムもしくは訓練終

了後に再現し，評価・検証する「訓練評価表示部」から構成されている．

3 OFTT の有効性

本装置で可能な訓練模擬機能の一覧を表 3 に示す．実機で行われる戦術内容をほぼ網羅している．監視・搜索・追尾訓練では，高価な各種センサーを海中に投下し実施するため，確実な成果が要求される．従って，本装置を利用し，より確実な，より効果的なセンサー敷設技術や索敵飛行パターンを繰り返し訓練することでクルー間の連携操作を確立し，より効果的な索敵パターンの試行・検証が経済的かつ容易にできる．また，事前に作成された訓練シナリオにより，訓練員に対し均一な環境を提供できるため，クルーの公平な技量検定や戦術競技に使用することが可能である．実際に本装置は，定期的に全国から各飛行隊の訓練員が集結し，実務さながらの緊張感の下，同一条件・同一環境で如何に正確なミッションを遂行できるかを競い，日頃の腕試しと士気の高揚に供されている．

表 1 P-3C 哨戒機搭乗員の役割

| 名 称 | 役 割 |
|---------------|-----------------|
| 操縦士（正・副） | 自機の操縦・航空管制担当 |
| 戦術航空士 | 機内における戦術の責任者 |
| 航法通信士 | 航法装置及び通信機器担当 |
| 第 1 及び第 2 対潜員 | 音響センサー担当 |
| 第 3 対潜員 | 非音響センサー担当 |
| 機上整備員 | 操縦士の補佐や飛行計器類の監視 |
| 機上電子整備員 | 搭載電子機器の機上点検整備担当 |
| 機上武器員 | 搜索兵装・攻撃兵装の管理担当 |

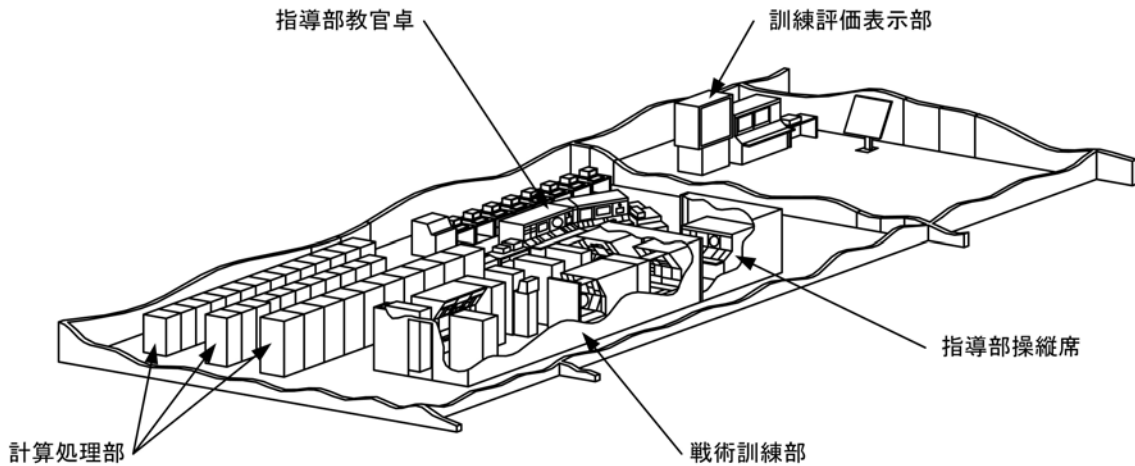


図1 OFTTの外観配置

表2 OFTT各部の機能概要

| 装置名 | 機能概要 |
|---------|---|
| 戦術訓練部 | 音響探知訓練，非音響探知訓練及び戦術航法訓練が実機と同様にできるよう各機器の機能を模擬している． |
| 指導部 | 戦術教官卓，音響教官卓，及び操縦士卓から構成され，戦術及び音響教官卓部にて訓練の監視及び指導を実施する．また，操縦士が戦術訓練に参加できるように戦術に関する操縦席装置を配置している． |
| 訓練評価表示部 | 訓練の評価及び訓練シナリオに使用するデータを作成する． |
| 計算処理部 | 訓練装置の実行制御を行う．また，各部の操作に必要な各種信号の演算処理を行う． |

表3 訓練模擬機能一覧

| 種別 | 内容 | |
|-------|---------|---|
| 対潜戦 | 非音響搜索 | レーダー搜索 ESM ^{※1} 搜索 |
| | 音響搜索 | パッシブ音響搜索 |
| | 追尾及び攻撃 | パッシブ追尾 アクティブ追尾 MAD ^{※2} 追尾 攻撃 |
| 対水上戦 | 搜索 | |
| | 対艦攻撃 | |
| 機雷敷設戦 | オンライン敷設 | |

※1 ESM:Electronic Support Measures

※2 MAD:Magnetic Anomaly Detector

4 運用支援の内容

大規模で複雑な本装置を運用するためには，運用支援が不可欠である。OFTT 3 式目が納入された鹿屋航空基地では，自隊訓練に加え全国各部隊からの訓練所要に応えるため，これらの運用支援は当社駐在技術員による常駐整備にて対応している。以下に，計画整備，計画外整備，及び訓

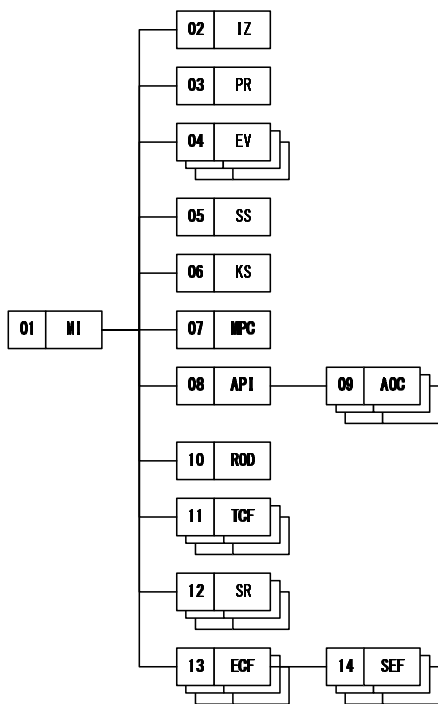
練支援の内容について述べる。

4.1 計画整備

計画整備は，訓練装置の機能及び性能の維持並びに機材寿命の延長を目的とし実施されている。整備項目は，日々点検，週間点検，月間点検，3 か月点検，6 か月点検，及び12 か月点検があり，各項目は重複することなくそれぞれのインターバルに応じた整備深度から構成されている。作業を円滑かつ効率的に行うため，整備手順要領は項目毎の整備カードにまとめられている。

4.2 計画外整備

計画外整備は故障発生時における復旧作業のことを指す。突発的な故障が発生した場合はまず訓練続行を第一優先とし，一部の機能を限定した仮処置をしてでも訓練中止を回避するよう心がけている。故障処置完了後には，FTA(Fault Tree Analysis)を参照しながら故障探求と故障探求ログのまとめ，FTAを随時更新し，定期的に当社整備部門との情報共有化を図っている。これにより，故障履歴の調査や処置すべき内容の把握が容易になるとともに故障探求から復旧までの時間短縮を図っている。



- 01 **MI** : **MISSION FILE**
訓練シナリオファイル
(番号 02～14 のデータ・ファイルを組み合わせたもの)
- 02 **IZ** : **INITIALIZATION FILE**
自機・目標・環境・通信等の初期データ等を設定する
- 03 **PR** : **PROFILE FILE**
IZ で設定した内容を時間に応じて自動的に変更させる
- 04 **EV** : **EVASION FILE**
目標の回避運動パターンを定義する.
- 05 **SS** : **SEARCH STORE FILE**
ソフバイの搭載状況を設定する.
- 06 **KS** : **KILL STORE FILE**
兵装並びに魚雷等の命中確率を設定する.
- 07 **MPC** : **MPC OCEAN MODEL FILE**
3次元海洋モデルを定義する.
- 08 **API** : **API OCEAN MODEL**
簡易な3次元海洋モデルを定義する.
- 09 **AOC** : **API OCEAN CHARACTERISTIC FILE**
水中音響伝播を定義する.
- 10 **ROD** : **RANGE OF THE DAY FILE**
アクティブバイの有効探知距離を定義する
- 11 **TCF** : **TARGET CHARACTERISTIC FILE**
水中及び水上目標の音響特性を定義する.
- 12 **SR** : **TARGET ACTIVE SONAR FILE**
水中及び水上目標が発するソナー特性を定義する.
- 13 **ECF** : **ESM CHARACTERISTIC FILE**
目標が搭載するレーダー装置を定義する.
(SEF ファイルを組み合わせたもの)
- 14 **SEF** : **SINGLE EMITTER FILE**
目標が発するレーダー緒元を定義する.

図 2 訓練シナリオファイルの構成

4.3 訓練支援

通常の訓練運用時には以下の支援を行っている。

(1) 訓練装置セットアップ

OFTT では、指導部教官卓から訓練シナリオを読み込む操作だけでは訓練を実施できる状態とはならない。戦術訓練部は実機システムを用いているため、実機同様に各システムの立上げ、訓練毎に設定を実施する必要がある。訓練員が事前打合せを実施している間に、駐在技術員が訓練シナリオに即した教官卓及び戦術訓練部の各種設定を実施している。これにより、訓練員は即座に訓練へ移行でき、効率的な訓練が可能となる。

(2) 訓練装置モニタ及び操作支援

訓練中は、訓練員の交話および訓練装置をモニタしている。これにより、故障の兆候把握や発生時の要因を的確に判断し、訓練中断に至る故障の防止に役立っている。訓練中の教官の役割は、潜水艦、僚機、僚艦など多岐に渡る設定項目を的確に操作するとともに、訓練員との交話をリアルタイムで実施する役割がある。技術駐在員は、このような教官作業の負荷を軽減し、訓練に集中できるよう教官卓操作の支援を実施している。

(3) 訓練シナリオ作成支援

図 2 に訓練シナリオファイルの構成を示す。14 種のデータ・ファイルでは、訓練エリアの海洋環境や潜水艦音響データ等の多項目にわたるデータを設定する必要がある。例え

ば、海洋環境データ (API, MPC 及び AOC) の作成に当たっては、海底地形データ (海底, 海溝, 及び海底突起物等), 音波伝播損失計算に用いる海中温度や音速プロファイルといったデータ [1],[2] を設定するとともに、想定していた海洋環境の再現とその正当性を確認する作業を必要とする。そのため、訓練シナリオ作成支援に当たっては、OFTT を熟知し、訓練する環境及び戦術について幅広く専門知識を持つ必要がある。駐在技術員は、訓練シナリオ作成者が想定している状況を把握し、その内容を適切なデータ値として反映するサポートを行っている。

5 むすび

鹿屋基地の OFTT は、故障による長期間の運用停止もなく現在に至るまで高い稼働率を維持している。納入から 17 年の歳月が経過し、老朽化が進行しつつも、次期哨戒機への完全移行にはまだ期間があるため、本訓練装置の所要延長が計画されている。このことは本装置構成部品の枯渇対策が今以上に必要となってくることを意味する。また、実機任務の多様化により、設計仕様以外の要求も予想されるが、常駐委託整備のメリットを最大限に生かして、お客様の装置に対する要求を素早く反映するインターフェース役となれるよう貢献していく所存である。

謝 辞

本論文の執筆にあたり、ご協力頂いた海上自衛隊鹿屋航空基地第一航空群の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] “海洋音響の基礎と応用,” 海洋音響学会編, 成山堂, 東京, pp.77-97, 2004.
- [2] 布田浩二, “水中音響模擬の技術動向,” 三菱プレジジョン技報, Vol.5, pp.15-24, May.2010.



林 勇己 略歴

1995年入社, 各種シミュレータ設計を経て, 防衛省向けシミュレータの保守整備に従事。現在海上自衛隊戦術訓練装置の保守整備を担当。鹿屋航空基地 OFTT 駐在チーフ。



新井 昌彦 略歴

1999年入社, 防衛省向けシミュレータの保守整備に従事。現在海上自衛隊戦術訓練装置の保守整備を担当。鹿屋航空基地 OFTT 駐在員。

QRコード記録券を用いた環境配慮型駐車場システムの開発

實松 佳樹，橋立 勇気，早川 正昭，橋本 晃，金村 友樹，佐々木 秀一，高木 繁嘉

要旨： 駐車場で用いる駐車券の記録情報として QR コード* を用いた駐車場システムを開発した。本システムでは磁気券による券情報記録を廃止し、環境に配慮した感熱紙による QR コード印刷を採用した。これにより、保守費用や消耗品にかかるランニングコストの削減も実現した。また、管理ユニットを用いた感熱紙の不正コピー防止対策を採用することで、QR コード仕様のサービス券の利用を実現するなど、今までに無い特徴を有する駐車場システムを構築できた。

1 まえがき

近年の市場動向として、環境に配慮した駐車場システムが求められている。このため、駐車券媒体として、磁気記録紙に代わり、QR コードで券情報を記録した感熱紙（以下、QR コード券）を採用した。QR コード券は磁気券に比べ 1 枚当たりの価格と、廃棄時の環境負荷が削減される。

また、磁気券対応の駐車場機器に比べて、用紙がかさばらないことで 1 回のセットで発行可能な駐車券の枚数が増加し、かつ読取が駐車券と非接触であることから、清掃や駐車券の補充などのメンテナンス作業の周期が長くなることで、保守費用の削減を実現している。また、一般利用者が利用可能な機器での券のコピーや解読などによる不正を防止するため、利用情報の管理による不正防止機能を開発し、駐車券の複製、改竄対策を実現した。これにより、駐車場利用サービスに加え QR コード券によるサービス券の採用も可能となり、利便性と信頼性を向上した駐車場システムとしている。

以下、2 章では QR コード券を用いた駐車場システムの要件を、3 章では駐車場における券の利用と管理を、4 章では QR コード券を用いた駐車場システム用に開発した機器を、5 章では開発機器を用いたシステム構築例を、それぞれ述べる。

2 QR コード記録券を用いた駐車場システムの要件

今回の開発は、環境への配慮と管理費用の低減を実現しつつ、従来型の駐車場システム相当の運用が可能となるものを目指して行った。以下で各々の事項と、条件となった事項について述べる。

2.1 環境への配慮と費用低減の両立

券媒体を磁気券から QR コード券に変更することで、環境への配慮と管理費用の低減の両立を実現した。具体的な効果を以下に示す。

(1) 環境への配慮

感熱紙を券媒体とすることで、従来の磁気券と異なり一般ごみ扱いで廃却が可能となり、廃棄時の環境負荷が削減される。

(2) 機器の保守費用の削減

磁気券では券読取時に券と読取部が接触して券面の汚れが付着することにより、券の読取性能を低下させることがあった。これに対して QR コード券はカメラで読取を行うので券面とは接触せず、繰り返して読取しても性能が低下しにくい。このため、メンテナンス回数を減らして、保守費用を削減できる。

(3) 消耗品の原価低減

感熱紙は磁気券に比べて安価であり、消耗品の原価を低減できる。これらの目標達成には、券媒体の選定が必要となる。選定条件としては、券媒体の耐久性確保と、費用面の妥当性の 2 点となる。

2.2 利用可能なサービス

QR コード券の利用について検討するため、磁気券について整理する。磁気券を用いた駐車場システムでは、以下の券種を用いたサービスが利用される。

(1) 駐車券

入庫時に発行される、入庫情報を記録した券。駐車場内に設置された精算機に読み込ませて、駐車料金の精算を行う。また、場内設置の認証機で割引情報を記録することで、駐車料金を割引することも可能である。

(2) 定期券

有効期限や精算方法を記録した券。入庫や精算を行う際に駐車場機器に読み込ませる。有効期間内は定期利用者として駐車が可能となる。

* 1「QR コード」は、株式会社デンソーウェーブの登録商標です

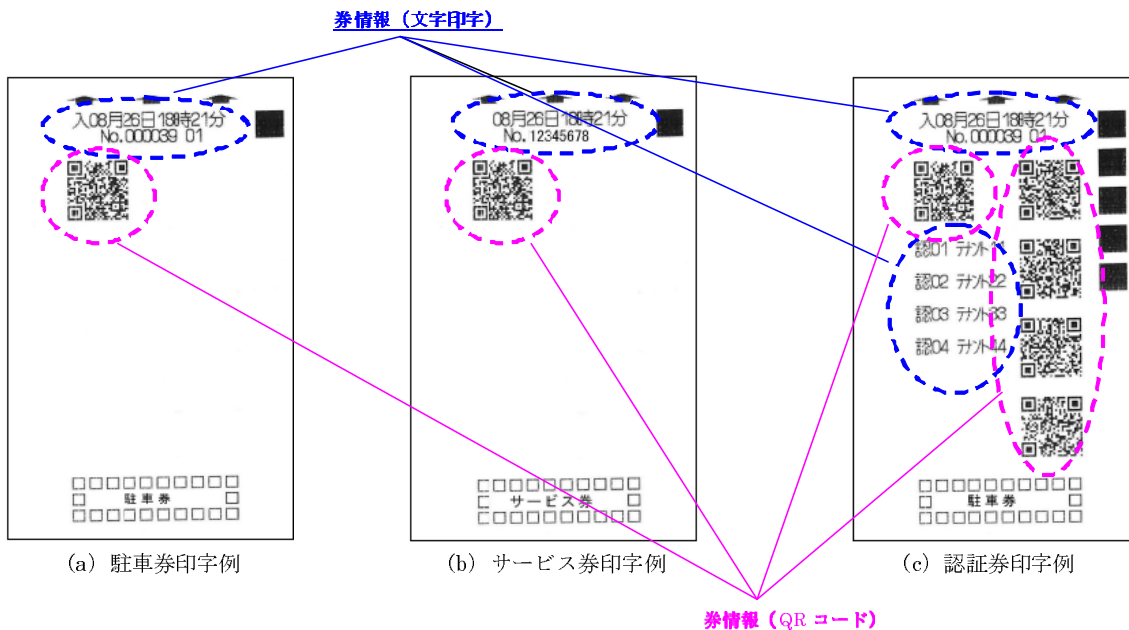


図1 QRコード券の印字例

(3) サービス券

割引情報を記録した券。精算を行う際に駐車券や定期券と併用することで、券に記録された額面分の駐車料金の割引を行う。

(4) 認証券

駐車券に対し、認証機で割引情報を追加記録した券。精算を行う際に記録した割引情報を適用することで駐車料金の割引を行う。基本的な運用を行う駐車場では、～の券が用いられるため、QRコード券を用いた駐車場システムにおいても、～への対応が必須となる。

2.3 QRコード券の不正防止対策

QRコード券を用いた駐車場システムを構築するためには、書き込み回数、領域の限られた感熱紙で、磁気券相当の利用および管理を実現する必要がある。ここでの「利用」とは券で利用可能なサービスを、「管理」とは利用情報の保存や不正防止などの管理機能を指す。

先に2.2項で述べた券によるサービスの実現に対して、磁気券では以下の不正防止対策が前提となっている。

(1) 券の複製防止機能

券情報の複写や改竄を防止するための対策。磁気券は媒体自体、一般利用者が所持可能な機器で読み書きできるものではないため、読取と複写を防ぐことができる。更に、券の記録情報は暗号化し、改竄を防いでいる。

(2) 利用情報の記録

券データに使用済情報やデータ消去などを行うことで、券の使いまわしを防止する。例えば定期券の場合、出庫情報が書き込まれた券では出庫できない様になっている。ま

た、サービス券の場合は使用後に券データを消去することで、仮に廃棄された券を使おうとしても利用できない様にしている。

(3) 在車管理による不正防止

定期券の様に、出庫後も券が手元に残る券への不正対策である。場内に在車管理用の機器を設置し、場内機器で入退場を管理することで、同一利用者の入退場を防止する。

3 QRコード記録券を用いた駐車場システムの構築

図1はQRコード券の印字例である。QRコード券は、磁気券では磁気データとして記録していた情報を、券面に印字したQRコードにより持たせている。また、QRコードとは別に券としての基本情報や駐車場名などのコマース情報情報が券面に印字されており、係員などが目視で券情報の確認を行うことが可能である。

QRコード券を採用するに当たり、不正防止を可能とするための検討事項について述べる。

3.1 券の複製防止機能

QRコード券は磁気券の場合と異なり、コピー機により容易に複製が可能である。更に昨今は携帯電話のカメラ機能やバーコードリーダーで券情報の読取、パソコンでプリンタを用いたQRコード印字なども可能であることから、データ改竄についても磁気券の場合より発生の可能性が高くなっている。このため、従来から行っている券データの暗号化に加えて、万一、券の複製やデータ改竄が行われた場合であっても判別できる様、駐車場機器側で券を不正利用

されない様にする対策が必要となる。

QR コード券では、複製防止のために以下の対策を行う。

(1) 券データ暗号化の強化

磁気券で行っていた暗号化処理を見直し、データ解読や改竄を防止している。

(2) 券面にコピー防止印刷を実施

券面に加工を施す事により、正規のものかコピーされたものかを判定できる様にした。

3.2 利用情報の記録

駐車場の券の取り扱いを大きく分けて、利用者に対する「発行」、駐車場機器での「読取」、割引情報を券に直接記録する「認証」、利用情報を書き込むための「更新」の4つに分かれる。QR コード券はこれらのうち「発行」「読取」「認証」については従来相当で取扱が可能となる。しかし「更新」は記録追加が必要となるため、精算による更新が繰り返し発生しうる駐車券の更新を、印字できる場所に限りがある QR コード券で行なうには限度がある。このため「更新」は券への記録以外の方法で対応する必要がある。

そこで、更新情報を管理するため QR コード券管理ユニットを開発した。駐車場内にある機器は、本ユニットを用いて更新情報の管理を行う。

4 QR コード券対応の駐車場機器の開発

QR コード券に対応した以下の駐車場機器を開発した。

(1) QR コード駐車券発行機 (QD-100)

図 2 に QR コード駐車券発行機 QD-100 の外観を示す。駐車場入口に設置し、QR コード駐車券の発行を行う。駐車券 6000 枚分相当のロール紙を 2 巻同時にセット可能で、これにより 1 回の用紙補充で、12000 枚の駐車券発行が可能となった。発行可能な枚数が大幅に増加したことで、用紙補充の手間が削減される。

(2) QR コード券対応リーダ (QRM-100)

図 3 に QR コード券対応リーダ QRM-100 の外観を示す。後述の QR コード券対応精算機に実装することで、QR コード券の読取を行う。基本機構は磁気券リーダをベースに設計、QR コードの読取機能を QR コード対応カメラで実現する構成である。券読取が非接触であるため読取を繰り返しても読取性能が低下しにくいことから、清掃などのメンテナンス作業が削減可能となる。また、磁気券対応精算機に対してリーダと制御ソフトウェアを QR コード券対応に換装することで、容易に既存機器への展開が可能な様に設計した。



図 2 QR コード駐車券発行機 QD-100



図 3 QR コード駐車券発行機 QRM-100



図 4 QR コード駐車券発行機 QP-100

(3) QR コード券対応精算機 (QP-100)

図 4 に QR コード券対応精算機 QP-100 の外観を示す。駐車場や店舗の出口などに設置し、QR コード券対応リーダで QR コード券での精算を行う。本機器は既存の磁気券対応の精算機である AP-390 とリーダ以外同じ構成である。

(4) QR コード駐車券認証機 (QV-100)

図 5 に QR コード駐車券認証機 QV-100 の外観を示す。店舗レジなどに設置し、QR コード券仕様の駐車券を挿入することで、駐車券に認証情報を最大 4 個まで記録することが可能である。



図5 QRコード駐車券発行機 QV-100

(5) QRコード券管理ユニット (QRU-01)

駐車場内に1台設置し、在車情報と券利用情報を保持して管理する。管理するデータは、次の3種類である。

- ① 在車情報
- ② サービス券利用情報
- ③ 認証券利用情報

本ユニットは小型のため、駐車場内にあるQP-100のいずれかに内蔵する形で設置される。但し、管理情報の閲覧や編集が必要な場合や、大規模なシステムでは、QRU-01の代わりに管理用PCを設置して対応する。

5 QRコード券を用いた駐車場システムの構成

4章で述べた機器を用いた駐車場システムの機器構成を図6に示す。認証機以外の機器は、場内回線を介してQRコード券管理用機器(PC又はQRコード券管理ユニット)と接続され、券情報の送受信を行う。各機器での動作を以下に示す。

(1) 入口 (QRコード駐車券発行機)

入口ではQRコード駐車券発行機で入庫操作を行う。入庫には、駐車券発行と、定期券の使用のどちらかを行う。駐車券で入庫する場合、券発行後にQRコード券管理用機器に駐車券情報の通知を行い、精算可能な券である事を登録する事で、場内や出口で利用可能となる。定期券ではこれに加えて、定期券を挿入した際にQRコード券管理用機器に問い合わせを行い、在車している券か否かを判定する事で、券の受け渡しによる不正利用の防止を行う。

(2) 場内 (QRコード券対応精算機、

QRコード駐車券認証機)

場内では必要に応じ、QRコード駐車券認証機での割引認証と、QRコード券対応精算機での事前精算を行う。割引認証は、駐車券に記録する。割引認証はオフラインで行われるため、この時点ではQRコード券管理ユニットでの処理は行わず、次回精算時に行う。

事前精算は、駐車券または定期券で精算を行う。各券は挿入時にQRコード券管理ユニットも問い合わせを行うことで、場内での利用情報を取得して料金請求が可能となる。更に認証券を挿入して精算開始した場合や、料金表示後にサービス券を挿入した場合は、それぞれQRコード券管理用機器に割引として使用可能かを問い合わせ、使用可能であれば割引として使用できる。各券の情報は、処理が完了した時点でQRコード券管理用機器に通知することで、利用情報の登録変更を行う事で、再精算時の料金や、不正利

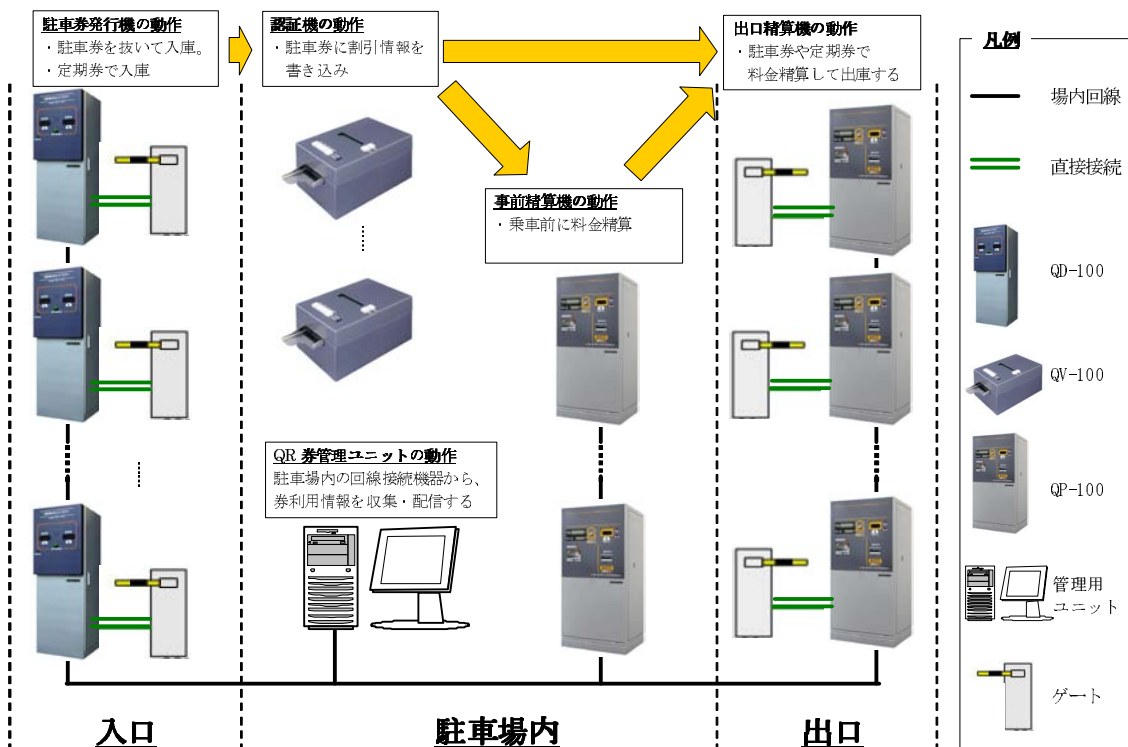


図6 QRシステム構成図

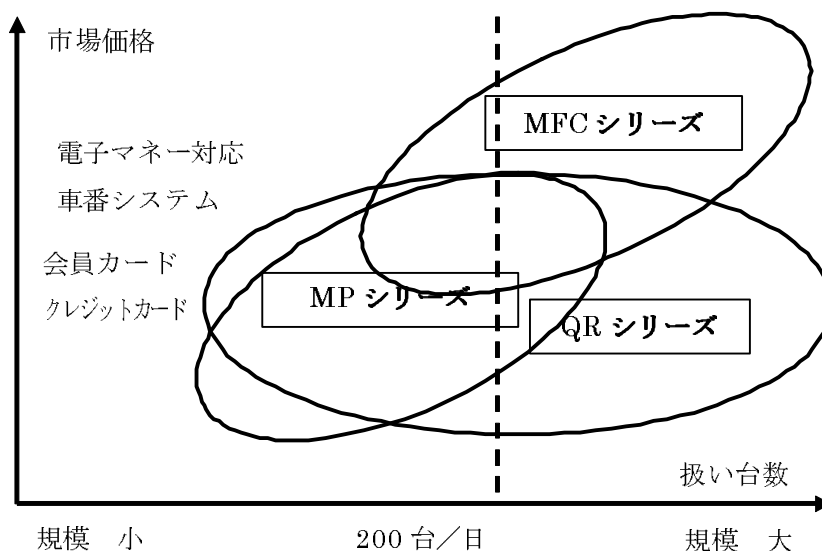


図 7 当社駐車場の価格・規模分布

用の防止などを行う

(3) 出口

出口では駐車券や定期券を QR コード券対応精算機で精算することで、駐車場からの出庫を行う。基本的な動作は事前機の場合と同様。

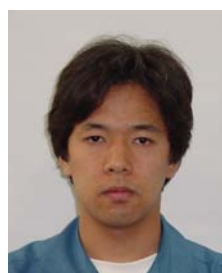
また、当社駐車場機器の価格規模分布を図 7 に示す。既存では耐久性と性能が高い MFC シリーズと、その廉価版と言えるマイパーク (MP) シリーズとがあり、扱い台数に応じてこれらを使い分けていた。これに対し、今回の QR コード券を用いる QR シリーズは券媒体とそれを用いる機器の特性上、扱い台数は MFC シリーズと MP シリーズどちらに対しても適用可能となっている。今回の開発では MP シリーズ相当の筐体で QR コード券対応を行うことで扱い台数と市場価格を実現したモデルとして開発したが、将来的には機能やサービスの拡充により、双方のシリーズでの展開が可能である。

6 むすび

QR コード券を用いた駐車場システムは、磁気券を用いた駐車場システム相当の機能と、メンテナンスや消耗品などの価格低減による運用コスト低減を特長にしたシステムとして開発された。

今後は、従来の駐車場システムで行ってきた電子マネーやクレジットなどのオプション機能の拡充や、大規模システムでの券利用管理に対応した管理計算機的设计など、今後出てくる顧客ニーズに応じたサービス強化を推し進める予定である。

【執筆者紹介】



實松 佳樹 略歴

2002 年入社、各種駐車場機器のソフトウェア設計に従事。現在、社会・交通システム部ソフトウェア課 略歴



橋立 勇氣 略歴

2007 年入社、各種駐車場機器の機構設計に従事。現在、社会・交通システム部技術二課



早川 正昭 略歴

1990 年入社、各種駐車場機器の電気設計に従事。現在、社会・交通システム部技術一課



橋本 晃 略歴

2006 年入社，各種駐車場機器の電気設計に従事．現在，社会・交通システム部技術一課
略歴



金村 友樹 略歴

2007 年入社，各種駐車場機器のソフトウェア設計に従事．現在，社会・交通システム部ソフトウェア課



高木 繁嘉 略歴

1988 年入社，駐車場事業のシステム設計に従事．現在，社会・交通システム部システム課

チケットレス宿泊車両認証駐車場システム

佐藤 均, 實松 佳樹

要旨： 宿泊車両認証システムとはホテル宿泊期間中に無料で駐車場の入出場を可能とするシステムである。車番認識システムから得られる車番情報と、宿泊用認証機から伝達される宿泊認証情報を連携させることにより、出入口を無料かつチケットレスで入出場可能とするシステムを開発した。これにより宿泊認証を受けた車両が自由に駐車場を入出場できるサービスを実現した。本稿では車番認識システムと連動したチケットレス宿泊車両認証駐車場システムについて述べる。

1 まえがき

ホテルは利用者に対して質の高いサービスを提供することを目的としており、ホテルに関連する施設は同じ目的を持って管理運営される。駐車場の設備、運用についても同様であるためホテル付帯設備としての駐車場は、

- ① 入出場車両に対する快適性と利便性の提供
- ② 差別化サービスのひとつであるバレーサービスの提供
- ③ 宿泊中利用者のスムーズな駐車場利用の実現

が求められる。

ホテル向け駐車場システムは車番認識システム [1] を活用しこれらの要求を満足してホテル駐車場運用を強力に支援するシステムとなっている。以下 2 章ではホテル向け駐車場システムの設計要件を、3 章ではホテル向け駐車場システムの概要、宿泊車両認証システムについて述べる。

2 ホテル向け駐車場システムの設計要件

表 1 に設計上の要件と駐車場システムを示す。ホテル駐車場では来場する車両のうち左ハンドル車両が占める割合が比較的高く、右ハンドル車両に対してはもちろんのこと左ハンドル車両に対する利便性を考慮することが要件となる。このため入口レーンの両側に機器を配置して左右対向システムとすることで左ハンドル車の運転席からの駐車券の取りやすさを実現する設計が必要である。更に出入口で車番認識を行い、場内で事前精算することによって出口では運転手を煩わせることなく自動出場を可能とする車番連動システムの導入が望ましい。

ホテル駐車場特有のサービスの中にエントランスでお客様の車両を預かって駐車し、チェックアウト時もエントランスまで回送するバレーという送迎サービスがある。この要件に対応するためバレーサービスを行なうスタッフポジション用に業務支援を行ないバレーサービスの対象となる

車両の車番登録機能、該当車両来場時の通知機能などの機能を網羅したシステムが必要となる。

宿泊車両がホテルチェックイン後に駐車場の出入りを繰り返す運用を想定し、これに対応できることが要件となる。ホテル利用者が訪れやすい場所に宿泊用認証機を設置し、宿泊車両認証サービスを実現するシステムが求められる。

3 ホテル向け駐車場システムの概要

3.1 ホテル向け駐車場システム構成

図 1 にホテル向け駐車場システム構成図を示す。ここではウェスティンホテル東京向け駐車場システムを例にとり説明する。当該駐車場は、地下自走式駐車場である。地上のエントランスを経てスロープを下り地下 3 階に行くところにある。2 章で述べた設計要件を満たすべく左右対向システムになっており、入口は発券機と車番認識装置を左右に 1 台ずつ設置している。出口も入口と同じ地下 3 階にあり精算機 2 台と車番認識装置 1 台を設置している。駐車スペースは地下 3 階から地下 5 階にあり、事前精算機は宿泊客が利用しやすい様にエレベーターホールに 2 台設置している。駐車場内の機器と管理 PC 間はパーキングバス（以下 P-BUS）という弊社独自の駐車場用ローカルネットワーク通信を使用している。ドアデスク用 PC および宿泊用認証機は LAN ネットワークを介して管理 PC と接続している。宿泊用認証機については 3.3 節で詳細を述べる。

表 1 設計上の要件と駐車場システム

| 番号 | 設計上の要件 | 駐車場システム |
|----|-----------|-------------|
| 1 | 左ハンドル車対応 | 出入口左右対向車番連動 |
| 2 | バレーサービス対応 | 車番登録 |
| 3 | 宿泊車両対応 | 宿泊車両認証 |

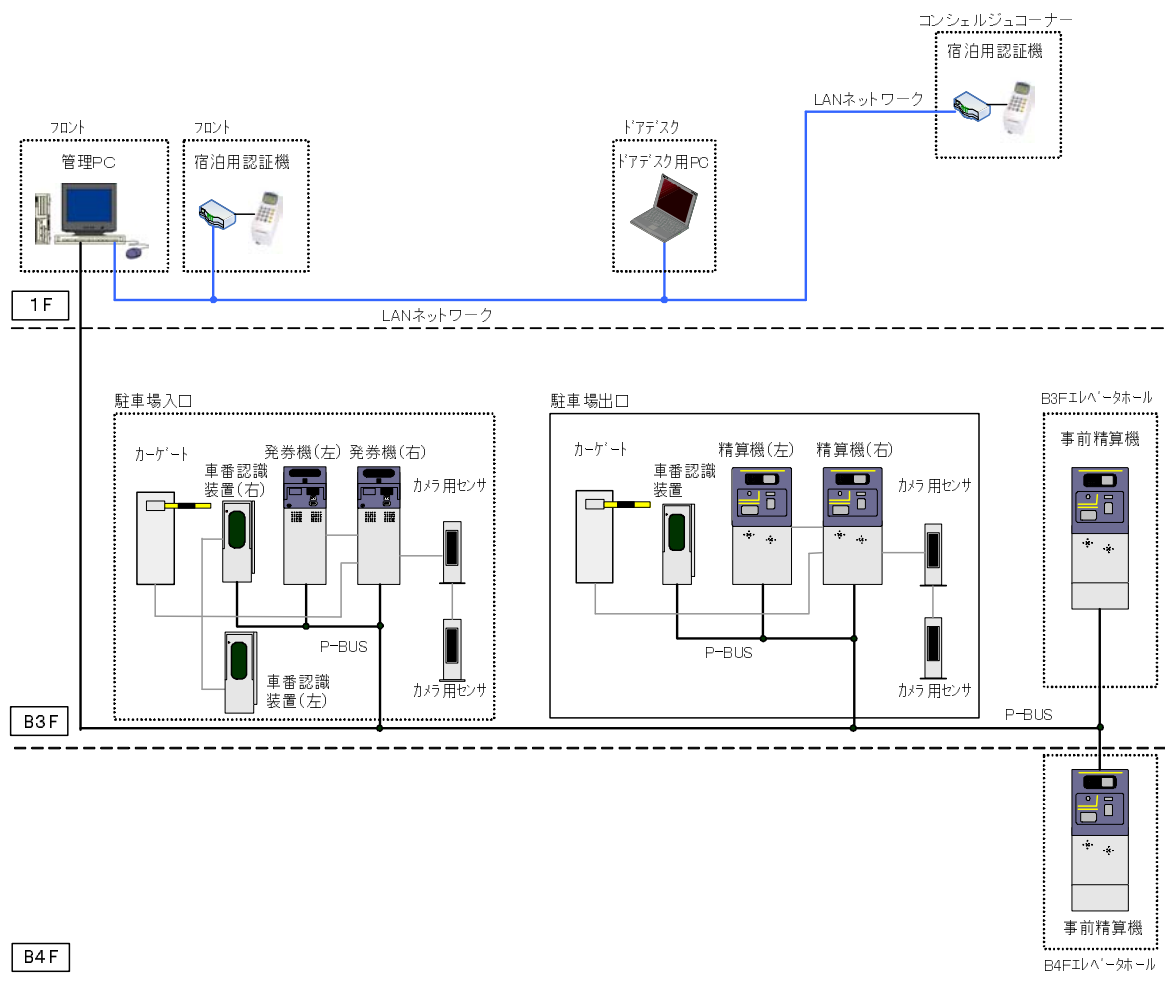


図1 ホテル向け駐車場システム構成図

3.2 駐車場利用の流れ

駐車場利用の流れは次の通りである。出入口では車両のナンバープレートを認識し車番を読み取る。読み取った車番情報は逐一管理PCに伝達し照会を行う。これにより定期契約車および後述する宿泊認証車両は入口にて自動でゲートが開き入場できる。一般車は駐車券を抜き取るとゲートが開き入場する。場内に設置した事前精算機で精算を行なうと精算情報が管理PCに伝達される。事前精算を済ませた車両および定期契約車と宿泊認証車両は出口にて自動でゲートが開き出場できる。図1中のドアデスク用PCはパーレーサービス業務支援用に開発した装置である。図2にドアデスク用PCの画面を示す。パーレーサービスの利用の流れは次の通りである。エントランスで利用客は降車して車両をドアデスクスタッフに預ける。このときスタッフはドアデスク用PCの「特定車両情報編集」メニューを選択して預かった車両の車番情報を登録する。登録した情報は直ちに管理PCに伝達され、出入口での車番認識、照会に反映される。車両を駐車場に回送する前に車番情報登録を行なうことで駐車場では自動でゲートが開き入出場

が可能となる。ドアデスク用PCの「特定車両情報検索」メニューを選択して表示することで、預かっている車両の駐車場在否状況の把握が可能となる。

3.3 宿泊車両認証システム

(1) システムの特徴

駐車車両が宿泊期間中に自由に駐車場を出入りするための機能を宿泊車両認証システムという。表2に本システムと従来方式との違いを示す。本システムでは宿泊用認証機をLANネットワークに接続してオンライン化し、管理PCに宿泊認証情報を伝送してデータ管理する方式とした。宿泊認証情報と車番情報をあわせてデータ管理することによりチケットレスでの入出場動作を実現することが可能となった。

宿泊用認証機には標準認証機を基にしてLANネットワークに接続して管理PCと通信する機能を付加した。利用客の駐車券を挿入し、宿泊日数をキー入力すると駐車券番号、宿泊日数などを含む宿泊認証情報を管理PCに伝送する。本システムを構成する管理PCには宿泊用認証機との通信機能および在車情報に宿泊認証情報を追記できる機

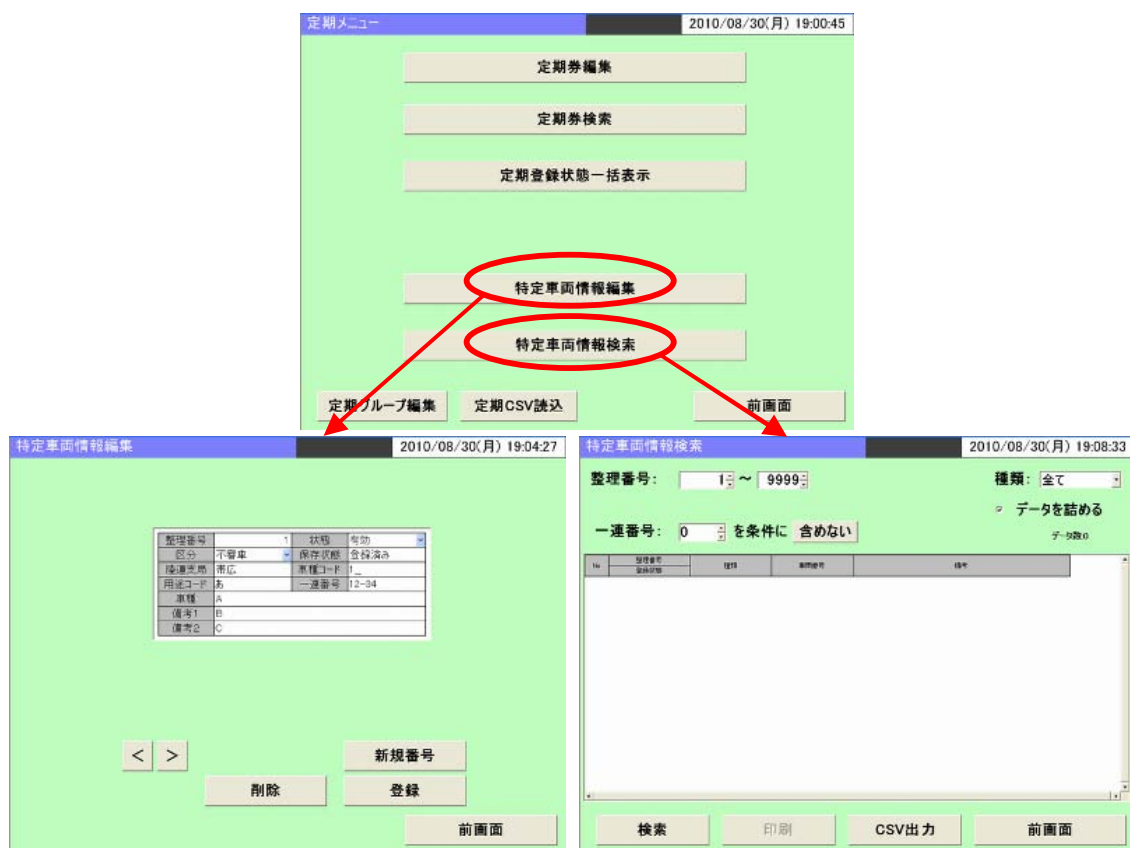


図2 ドアデスク用 PC 画面

表2 本システムと従来方式の違い

| | 本システム | 従来方式 |
|---------|-------------------------------|-------------------|
| 対応機器 | 宿泊用認証機 (オンライン) | 宿泊券作成機 |
| 宿泊情報 | 管理PC 伝送 | 媒体記録 |
| 入出場動作 | 車番認識 自動ゲート開 | 媒体挿入 ゲート開 |
| 利用者メリット | 期間中無料かつ チケットレスで 駐車場利用可能 | 期間中無料で駐 車場利用可能 |
| 管理者メリット | 宿泊車両個別の 駐車場在否情報 が確認可能 | — |

能を付加した。駐車場管理者は在車情報を閲覧する機能を利用して宿泊認証車両の駐車場在否状況を把握することを可能とした。

従来方式では、入出場時に使用する媒体（駐車券等）に特別な磁気記録を行い実現していた。宿泊期間等の必要情報は媒体に記録してあるため、出入口では必ず媒体を使用しなければならなかった。

(2) 宿泊車両認証の流れ

図3 に動作フローを示す。

- ① 宿泊車両はチェックイン時、一般車両として駐車券を抜いて駐車場に入場する。その際管理 PC では該当車両の在車情報を生成する。
- ② その後フロント若しくはコンシェルジュコーナーにて駐車券を宿泊用認証機で認証する。
- ③ これ以降で車両が駐車場を出入りする際、読み取った車番情報を元に在車データを検索して宿泊認証した車両である場合は自動でゲートを開ける。

宿泊認証を受けた車両はホテルをチェックアウトするまでこの動作を繰り返し行なうことが可能となる。

4 むすび

本稿ではチケットレス宿泊車両認証システムを中心にホテル向け駐車場システムについて述べた。本システムを含む最新の駐車場システムは2010年9月に恵比寿ガーデンプレイス内にある「ウェスティンホテル東京」駐車場に導入された。図4,5に駐車場入口とドアデスク用PCの写真を示す。当該駐車場は

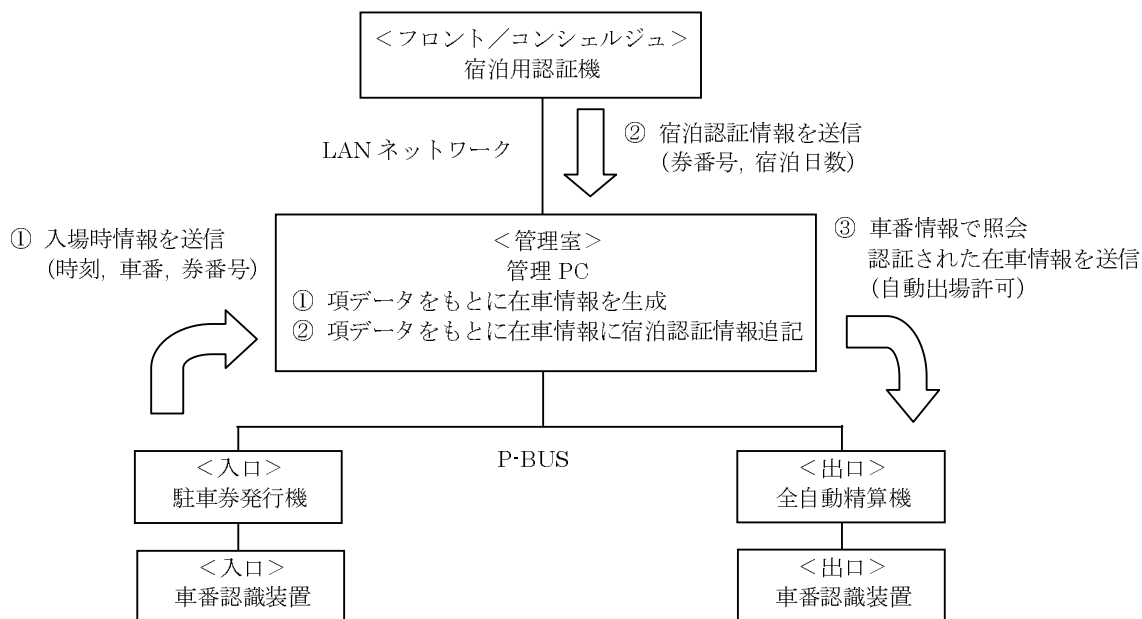


図3 動作フロー



図4 駐車場入口



図5 ドアデスク用 PC

③ 宿泊用認証機導入によるチケットレス宿泊車両認証の実現によりホテル向け駐車場の設計上の要件をすべて満足した駐車場システムとして稼動している。

駐車場は設置される施設によっていろいろな業態，運用，サービスが存在する．今後もホテルの駐車場運用に特化した本システムのようにそれぞれの施設の持つ要件に最適な駐車場システムを設計し，利用者や施設管理者に高い顧客満足を提供していきたいと考える．

謝辞

本稿記載に快く応じてくださったウェスティンホテル東京ならび富士ダイナミクスのご関係者皆様に厚く御礼申し上げます．

参考文献

- [1] 館 和嘉, 関 真規人, “新型車番認識システム,” 三菱プレジジョン技報, Vol.4, pp.40-44, May.2009 .

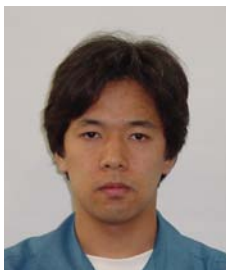
- ① 入口は左右対向システムを適用して発券機と車番認識装置を左右に1台ずつ設置し，左ハンドル車両の駐車券の取りやすさを実現．
- ② ドアデスク用 PC の導入によるバレーサービス業務支援の実現，

[執筆者紹介]



佐藤 均 略歴

1991年入社。以来、駐車場事業のシステム設計に従事。現在、社会交通システム部システム課



實松 佳樹 略歴

2002年入社、各種駐車場機器のソフトウェア設計に従事。現在、社会・交通システム部ソフトウェア課

複数商業施設向け駐車場総合管理システムの開発

加藤 圭介, 舘 和嘉, 遠藤 公高

要旨： 駐車場を持つ複数の商業施設において、商業サービスと一体化した駐車場総合管理システムを開発した。駐車場間は、VPN*によりネットワーク接続し、駐車場内は、Pパス†によりネットワーク接続する、認証データにおいては、磁気を媒体に駐車場を総合管理するシステムとして構築した。これにより、利用客は任意の店舗で買い上げた金額の合算に応じて駐車料金のサービスを受けることができ、各店舗側はサービスした駐車料金を個々の売上金額に対応した金額のみ負担し、運営側は、人件費を削減するなどの顧客サービスを可能にする駐車場システムを実現した。

1 まえがき

近年駐車場システムは、単に自動化を図り駐車スペースを提供するだけのものでは無くなってきている。特に商業施設においては、その地域への集客を図るため、利用しやすく、いろいろなサービスを展開できる付加価値や差別化されたシステムが必要になってきている。今回システムの開発においては、複数の施設が広域に存在し駐車場も複数点在する事業者から、利用者にどこの駐車場へ停めてどの施設を利用しても同じように駐車サービスを提供したい、かつ、各店舗への駐車サービス料金の負担を公平にしたいという要求があった。本課題を克服するために、以下の技術により駐車場総合管理システムを構築した。複数点在する駐車場間を結び統合管理するため、また、通信の安全性、及び、リアルタイム性を確保するため VPN によるネットワークを採用した。また、駐車場利用の共通サービスと公平な負担を克服するために、買上認証サービスを適用した。以下、二章で、駐車場総合管理システムの構成を、三章で総合管理システムの機能を述べ、四章では、本システムの「たまプラーザ地区への適用例」を紹介する。

2 駐車場総合管理システムの構成

本システムの構成例について、図 1 は、複数の駐車場を総合管理する駐車場総合管理システムの構成を示す。図中「総合管理計算機」は、A 駐車場内に設置し、イーサネットにて A 駐車場副管理計算機と接続した。その他分散している B 駐車場から G 駐車場の副管理計算機とは「B フレッツ*1VPN 網」にてネットワーク接続し管理した。また、総

合管理計算機は、接続している副管理計算機より売上データ、台数データなど集計し、サーバへは売上データ及び店舗請求データを保存する。図 2 は、各駐車場管理システムの構成を示す。一駐車場の基本システム構成は、副管理計算機、副監視盤、駐車場入口の駐車券発行機、出口の全自動精算機とカーゲートである。駐車場の規模により、事前精算機、ユニバーサル対応の事前精算機、案内表示灯、警報灯の車路管制設備、車番認識システムなどの機器を設置した。認証機においては、各店舗にオフラインで設置可能であり、AC100V 電源のみ使用する。副管理計算機は、主に駐車場入口機器からの入場台数データと出口機器からの出場台数データを受信し台数データを集計する。さらに、事前精算機及び出口機器の全自動精算機より精算データを受信し売上データを集計する。副監視盤は、入口機器、出口機器からの台数データを元に駐車場全体の満車判定をする。また、副監視盤は、駐車場内の車路管制設備より場内の台数データを受信し、場内ブロックの満空案内制御を行う。

3 総合管理システムの機能

3.1 総合管理計算機の機能

(1) 主機能

総合管理計算機は、接続する複数の駐車場の入車、出車、在車台数及びその満車 / 空車状態を表示する満空管理、売上データを集計する帳票作成、各駐車場機器からの警報を表示する警報表示の機能がある。

(2) 帳票作成

総合管理計算機は、接続する各駐車場の副管理計算機より駐車場料金精算データを受取り帳票の作成をする。帳票は、日報、月報、年報を作成する。

(3) 店舗請求作成

総合管理計算機は、各駐車場から精算集計した DB サーバの売上データより、各店舗で提供した割引サービスの合計額を集計した店舗請求データを作成する。

* VPN : (Virtual Private Network) 公衆回線をあたかも専用回線であるかのようにセキュリティーを高めた利用ができるサービス。

† P パス : (パーキングパス) 駐車場用ローカルエリアネットワークである専用シリアル通信回線。

*1 B フレッツ : NTT 地域会社 (東日本・西日本) の、光ファイバーを用いたデータ通信サービス。

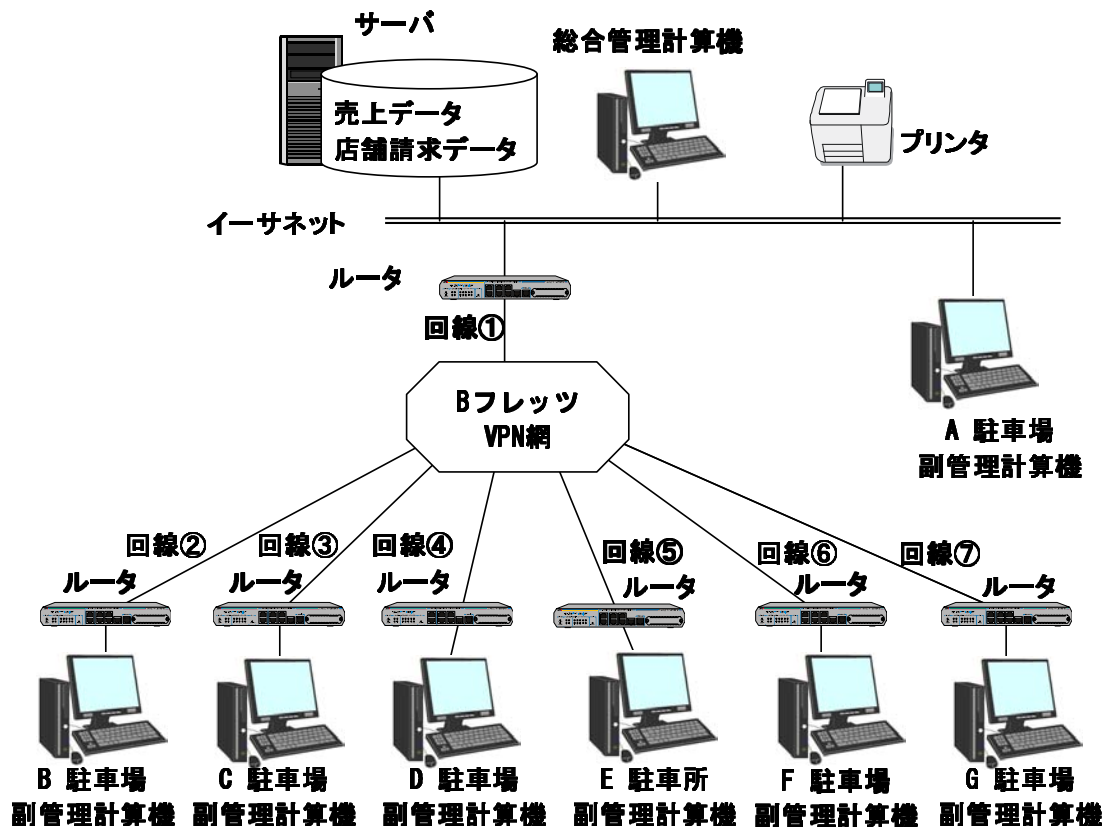


図1 駐車場総合管理システムの構成

(4) 警報表示

総合管理計算機は、警報画面を選択し各駐車場の警報内容を確認できる。また、総合管理計算機は、各駐車場より駐車場機器の警報（釣銭切れ、駐車券切れなど）が発生した場合、自動で警報画面へ切り替わりブザー音と共に係員へ報せる機能がある。

(5) ゲート遠隔操作

総合管理計算機は、ゲート操作画面より開操作、開保持設定することができる。開操作は、各駐車場の入口または出口において駐車券の発行、精算をしないで車両を1台通過させたいときに使用する機能である。開保持操作は、各駐車場の入口または出口において駐車券の発行、精算をすることなく連続的かつ長い時間車両などの通行を可能としたい場合に使用する機能である。

3.2 買上認証割引サービス機能

(1) 買上認証動作フロー

利用者の買上認証については、図3 買上認証動作フローにて示す。

- ① 利用者は、駐車場入口において駐車券を受け取り、入場する。
- ② 利用者は、各店舗で買い物する。各店舗の店員は、利用者の駐車券を受け取り、認証機にて買上げた金額を

入力し認証する。駐車券には、買上金額、買上金額の累計などが書き込まれる。

- ③ 利用者は、出場の精算（事前精算含む）において、精算機に認証を受けた駐車券を挿入する。精算機では、駐車券に記録した買上金額の合算に応じて割引した駐車料金を計算する。利用者は、割引サービスを受け精算し出場する。

(2) 買上認証割引サービス

- ① 買上認証割引サービスは、異なる施設へ設置した認証機でも駐車券に割引認証をすることができる。買上認証割引サービスは、個々の店舗において買上金額を認証機に入力し、各店舗で入力した買上金額を合算することができる。出口または事前精算においては、合算した買上金額で割引計算する。
- ② 買上認証割引サービスは、認証機を通常の1時間、2時間、1,000円割引などの割引認証に設定し併用することができる。
- ③ 買上認証サービスは、駐車券に買上金額、店舗などの情報を認証ごとに磁気記録し、店舗と買上金額をサービスした金額と関連付け案分することができる。

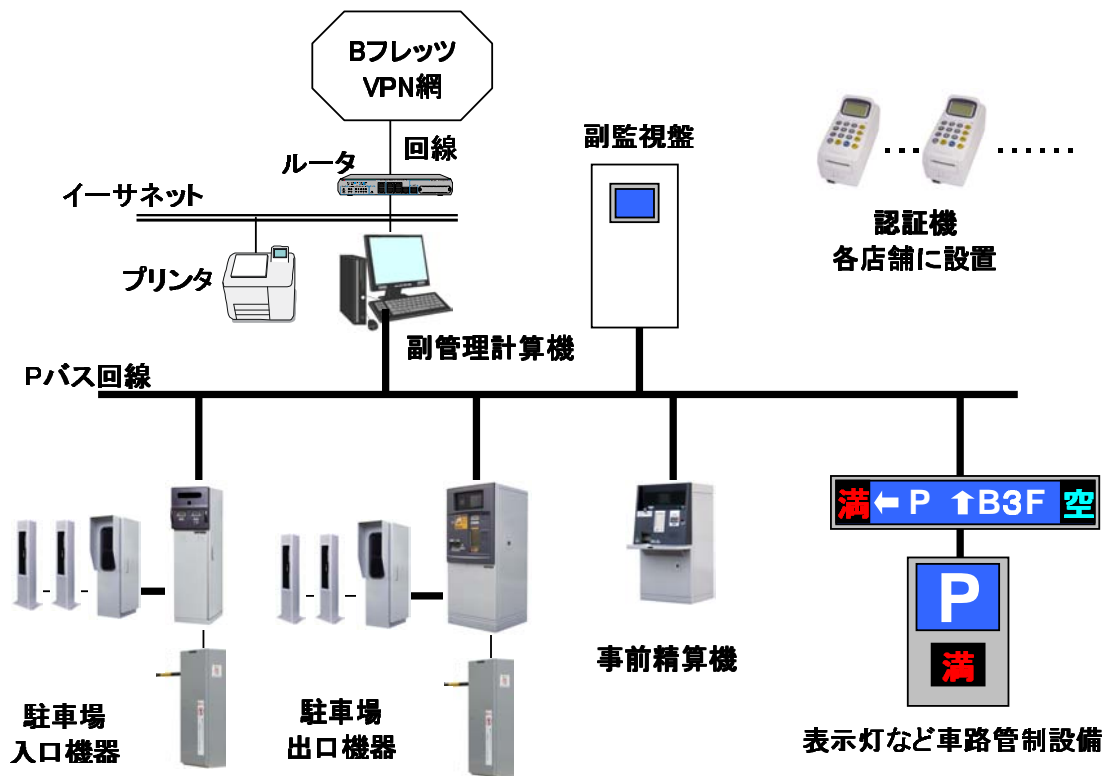


図2 各駐車場管理システムの構成

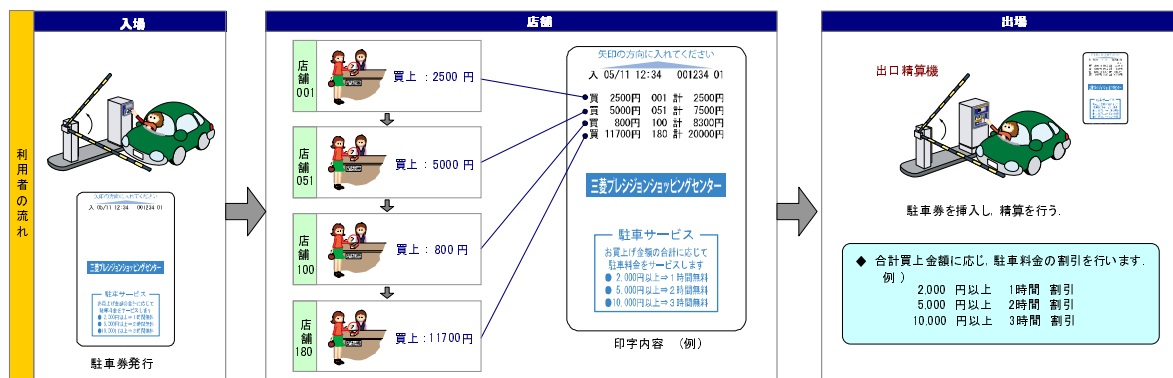


図3 買上認証動作フロー

4 たまプラーザ地区への適用例

4.1 システムの特徴

本システムは、7箇所の駐車場全体を1つの駐車場と同じように総合した管理ができるため、利用者が7箇所のどこの駐車場を利用しても、また、施設内のどこの店舗を利用しても共通にサービスを提供することができる。このことにより、各駐車場の人員を効率的に配置し利用客への誘導サービスなどに力を注ぐことができる。かつ、本システムは、買上認証サービスを導入し、利用客は、各店舗で買い物した買上げ金額の合算に応じて駐車料金の割引サービスを受けることができる。更に、割引した駐車サービス料金を各店舗の買上げ金額に応じ案分できる。

4.2 システム導入のメリット

(1) 利用者へのメリット

- ① 駐車場の利用者は、異なる施設の各々の店舗において買い物をすることができ、個々の店舗にて駐車場の割引認証サービスを受けることができる。従来、利用客は、異なる施設で買い物をするときは、その施設ごとにレシートを提示し、駐車券に割引認証を受けたり、サービス券を受けるなど面倒であった。本システムは、その煩わしさを解消した。
- ② 利用客は、各店舗において通常割引サービス未滿の買い物金額であっても認証を受けることができる。そして、各店舗で買上した金額の合算により駐車場の割引



図4 ユニバーサル対応の事前精算機



図5 車番認識システムを導入した駐車場の出口

サービスを受けることができる。

(2) 店舗へのメリット

- ① 各店舗において、駐車券を割引認証する操作は、認証機に利用客の買上げた金額を入力し駐車券を認証するだけである。そして、各店舗は、個々の利用客の買上げに応じて駐車場割引サービスを負担することになる。
- ② 各店舗は、数店舗で買い物している利用客に対してサービス券を余分に配布する必要がないため、無駄な駐車サービス料金の負担をする必要がない。
- ③ 各店舗は、請求の一本化により各駐車場からの請求を個別に対応する必要がなくなる。

(3) 管理者のメリット

- ① 駐車場の管理者は、買上認証サービスを総合管理することにより、サービスカウンタの縮小、削減、売上集計作業など少ない人件費で各店舗へ公平な駐車場サービス料金の負担を請求することができる。
- ② 施設管理は、各店舗に AC100V の電源を用意し認証機を設置するだけで余分な配管配線工事が不要である。また、施設管理者は、店舗の入れ替えを容易にできる。

4.3 実施例

(1) ユニバーサル対応の事前精算機

施設の一部に図4のユニバーサル対応事前精算機を設置した。本精算機の機能は、通常の精算機と同じ機能を有し、かつ、車椅子を使用している人などへも配慮した設計になっている。

(2) 出口ゲート

図5は、車番認識システムを導入した駐車場の出口ゲートである。車番認識システムは、車両が入場すると駐車券番号、車両番号を登録し、事前精算をするとその精算データも記録する。車番認識システムは、出口ゲートにて車両番号を認識し、事前精算済と判定するとゲートを開け車両

を出場させる。このように車番認識システムは、出口ゲートでの駐車券挿入、精算操作が無くなるなどバリアフリー化を進めた駐車場システムである。

5 むすび

本稿では、複数商業施設向け駐車場総合管理システムの機能およびメリットを述べた。この駐車場システムは、たまプラーザ駅周辺商業施設の開発に合わせ2010年10月より本稼働している。今後とも、駐車場経営・運営者、駐車場利用者双方に満足度の高いシステムを提供していきたいと考えている。

謝辞

たまプラーザ地区駐車場へ総合管理システムを導入及び本稿作成に際しては、東京急行電鉄株式会社様、株式会社東急モールズデベロップメント様、東急建設株式会社様のご指導、ご支援、ご協力を頂き実現できたものであり、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 館 和嘉, 関 真規人, “新型車番認識システム,” 三菱プレシジョン技報, Vol.4, pp.40-44, May.2009 .

[執筆者紹介]



加藤 圭介 略歴

1985 年入社, レーダ信号処理設計, 交通管制機器品質管理, 営業に従事。現在, 社会・交通システム部システム課



館 和嘉 略歴

1995 年入社, 駐車場事業の機器開発, 及びシステム設計に従事。現在, 社会・交通システム営業本部駐車場システム営業部駐車場システム第二グループ



遠藤 公高 略歴

2005 年入社, 駐車場管理計算機のソフトウェア設計に従事。現在, 社会・交通システム部ソフトウェア課

編集後記

当社 50 周年に向け、定期的な技報の発刊を再スタートして4巻目を数える事となりました。前3巻は教育、訓練を目的とするシミュレータに焦点をあてて、ご紹介させていただきましたが、本巻では東京大学大学院工学系研究科の中須賀教授に特別寄稿をお願いするとともに、宇宙分野における当社のアクティビティを掲載させていただきました。先生のご解説にもありますように、宇宙開発は重要な国家施策であり、我国の技術力の高さを示すものでもあります。その一端に参加しているという思いは、当社においても高いモチベーションを維持する原動力となっており、今後も品質を第一に、宇宙開発へ少しでも貢献していくことができるよう努力していく所存です。

シミュレータ及び駐車場システムにおける技術開発の最新情報に関しましても前3巻と同様に、継続して掲載いたしました。これらの論文によって、当社製品のバックグラウンドにある技術力を、少しでも高めて行こうとする試みがお伝えできれば幸甚です。

次巻は 50 周年となる記念の号となりますが、その後も継続して、当社の特長ある技術と製品の紹介を続けてまいりますので、引き続きご愛顧賜りますようお願い申し上げます。

三菱プレジジョン技報編集委員会

編集責任者 春田健雄 記

三菱プレジジョン技報 Vol.6

©無断転載を禁ず

発行日：2011年5月11日

発行元：三菱プレジジョン株式会社

URL：<http://www.mpcnet.co.jp/>

本社／〒135-0063 東京都江東区有明 3-5-7

TOC 有明 イーストタワー13階

TEL (03)5531-8060

鎌倉事業所／〒247-8505 神奈川県鎌倉市上町屋 345

TEL (0467)42-5555

発行責任者：松永 誠

編集責任者：春田 健雄

印刷所：株式会社三菱電機ドキュメンテクス

〒272-0127 千葉県市川市塩浜 3-12

(非売品)

