

Vol.7

MITSUBISHI PRECISION CO., LTD.

三菱プレシジョン技報

2013



表紙写真

宇宙航空研究開発機構(JAXA)殿所有の飛行シミュレータシステムの一つである回転翼機型コックピットシステム FSCAT-R“Flight Simulator Complex for Advanced Technology-Rotorcraft”(特別寄稿 pp.2-3). 10mハーフドームスクリーンにプロジェクタ6台で窓外視界を表示し、電動6軸動揺装置を装備しています。

当社は、本シミュレータで“ダイナミック歪み補正技術”(論文 pp.5-8)を組み込んだ、“飛行運動演算装置”、“電動6軸動揺装置”、“模擬視界映像発生装置(DiaScene IG-95)”, および粒子モデルを導入した(関連論文 pp.9-15) 模擬視界データベースを担当しました。



この映像の作成に当たっては、国土地理院長の承認を得て、同院発行の数値地図 50m メッシュ(標高)を使用した。(承認番号 平 24 情使,第 588 号)
使用データ LANDSAT 7 クレジット (C) Geoscience

「不断の取り組み」と「ソリューションの継続的な提供」

取締役社長
下村 寛士



三菱プレジジョン技報第7巻を上梓させていただきます。今回は、独立行政法人宇宙航空開発機構、研究開発本部飛行技術研究センタの船引先生に「研究用飛行シミュレータにとって大切なこと」と題しての特別寄稿をいただきました。訓練用のシミュレータから、研究用のシミュレータとしての展開に当たっての各種ご研究の紹介をいただくとともに、「大切なこと」についてのご教示をいただきました。その中で、基本機能の高さは当然として、「基盤的な不断の取り組み」をあげていただいております。「不断の取り組み」については、研究用シミュレータに限らず、すべてのものに対して重要なことと考えておりますが、従来より、当社として「ソリューションの継続提供」を目指している中で、それに必須の項目としての「不断の取り組み」を本技報にてご紹介できるものとなっている事を望む次第であります。

一般論文においては、それら「不断の取り組み」をご紹介すべく、各種のシミュレータ、および衛星向けホイール、MEMSを用いたジャイロから、日常的に目にされる機会も多い駐車場のシステムにいたる、各種の技術についてのご紹介をさせていただいております。

シミュレータにとっての重要技術である、表示、視界についての取り組みについては、ひずみ補正、粒子モデルを導入、赤外線カメラ映像発生等の成果を、また、表示そのものに加えて、いかに現実を模擬していくか、との観点から人物の動作表現についての高度化の開発のご紹介をさせ

ていただきました。当社にとっての新規エリアに対しての継続的な開発として「術前計画型シミュレータの開発および臨床評価」の論文では、内視鏡下においてのより安全な手術を目指しての開発をご紹介させていただいております。本件については、機器としての形も整いつつあり、術前計画とともに、訓練用のシミュレータに対しての機能の向上を目指した開発も実施しております。

環境配慮型自動車教習所向け模擬運転装置については、お客様にもご評価を頂き、計画以上の生産により、環境負荷の軽減と高機能設備の供給の双方の任を果たせたことについては、適切なソリューションを提供できたと考えており、大変にうれしい次第であります。

すでに当社製品として、ご愛顧をいただいている衛星向けホイールやジャイロについての不断の改善の成果としては、超小型衛星向けのホイール、MEMS ジャイロの開発成果を紹介させていただいております。

また駐車場関連のシステムについて、よりご利用をいただくために、車番認識の高速化、ロック板式のシステムについての開発の成果もご紹介しています。

当社としては、引き続きお客様の各種のご要求に確実にこたえ、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いく所存です。

本号をご高覧いただきますとともに、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よろしくお願い申し上げます。

研究用飛行シミュレータにとって大切なこと

独立行政法人
宇宙航空研究開発機構

船引 浩平

航空分野においては、古くから訓練用として飛行シミュレータが用いられてきた。また、第二次大戦の前後から主に操縦性に関する研究にもシミュレータが用いられるようになり、現在では航空システムの研究においては必須のツールとして、操縦性だけでなく様々な目的に用いられている。訓練目的のシミュレータが明確な基準に沿うように作られ、その模擬範囲と精度を向上させることを技術目標としているのに対して、研究用シミュレータの形態や使われ方は多岐に亘り、一概に必要な機能や性能を示すことも難しい。かつて操縦性や飛行性が重要な研究テーマであった時代と異なり、近年はますます多種多様な実験に使われるようになってきた。本稿では、近年実施された JAXA の保有するシミュレータを用いた研究のいくつかを紹介して、航空技術における研究用シミュレータに求められるものについて考察する。

研究例その 1：地上走行支援技術

大型旅客機のcockpitの高さはビルの三階に相当し、地上走行には相当な技量が必要である。上空での操縦性に関しては FBW(Fly by Wire) の採用などによる技術の発展があったが、それに比べて地上走行時の操縦性に関しては疎かにされてきた。この研究では地上走行時の操縦性を向上させる制御則とディスプレイを開発し、その有効性をパイロットの操縦によるシミュレータで検証した。一般的に飛行シミュレータに用いられる地上走行のモデルは、例えば自動車のそれと比べて簡略化されており、操縦性の評価に用いるためには不十分であった。そこで、高速度カメラを用いて飛行機の着陸時や走行時の車輪の回転を計測し、作成した高精度モデルの検証を行った。

この地上走行時の機体のモデリング技術に基づき、着陸時に滑走路から誤った誘導路に進入してしまうケースについてその対策を検討する実験を実施した。この実験では空港面の様々な案内表示をパラメータとして、パイロットにとっての認識性や視認性を評価した。シミュレータの模擬視界はどのような高解像度のディスプレイでも人間の視力

に比べて劣るため、標識の大きさや色は現実のそれと一致させることはできず、実験の目的に合わせたキャリブレーションが必要になった。

研究例その 2：モーション性能基準の評価

訓練用シミュレータにおいて、機体の運動は実機の飛行履歴と一致することが求められているが、モーション装置の挙動については数値的な基準がなく、極言すれば、ただハードウェアがあれば良いというような要求に留まっている。自動化により状況認識が低下することによる異常姿勢の問題など、極端な飛行状態に対応する訓練の必要性が議論される中、モーション装置にも数値的な要求基準が設けられるべきという議論が ICAO を中心になされた。JAXA ではこのような学会等の動きに連動して、保有するシミュレータのモーション性能を計測し、モーションの駆動アルゴリズムのパラメータを可変して操縦性への影響を調べる



地上走行モデルを検証する飛行実験：手前は高速度カメラ



誘導路への誤進入に関する実験での標識



固定翼用シミュレータの外観



回転翼機用シミュレータによる視程不良状態の模擬

実験を行った。最終的には操縦性を変更できる航空機であるイン・フライト・シミュレータにシミュレータと同じ運動モデルを組み込み、実機とシミュレータの比較を行って、モーションシステムの妥当性を判断する基準案を策定した。

この実験では、シミュレータのモーションアルゴリズムが自由に変更できる構成になっており、かつ実際の航空機で行った実験と結果を比較検証できることが機能として重要であった。

その3：状況認識支援技術の評価

夜間や低視程状態など窓外情報が十分に得られない環境で、コンピュータとセンサ情報から生成された視界をパイロットに示すことで、任務を可能にするためのS/EVS(Synthetic / Enhanced Vision System)の研究を進めてきた。システムの有効性を検証するためには窓外視界が十分でない状態で評価する必要があるが、実際の飛行環境で安全性を確保しつつそのような条件を作ることは難

しく、飛行シミュレータによる評価が重要になる。ミリタリを想定したシミュレータには赤外線画像の生成などの機能を持つものもあるが、JAXAのシミュレータでは別システムのシミュレータの模擬視界チャンネル映像を加工し、模擬されたカメラの動きに連動させてディスプレイに表示した。また、模擬視界データベースには低空を飛行するエリアを限定して、航空写真から高精細なテクスチャを配置した。パイロット・ディスプレイ関連の実験では、実機での飛行評価に先だって表示内容や手順を確認し、慣熟するためにもシミュレータはなくてはならないツールである。

以上の研究例で見てきたように、特定用途・特定機種を想定しない汎用型の研究飛行シミュレータは、その実験目的に応じて柔軟にハードウェアやプログラムを変更し、追加できることが重要である。すなわち、一つの汎用的なシミュレータを様々な用途に使うというよりは、個々の実験毎にソフトやハードを再構成して実験環境を構築すると言った方がよいかもかもしれない。それは航空技術のトピックスの変化とも連動しており、今後さらに求められるシミュレーション技術が変化し、かつ高度な模擬度を求められるようになることが予想される。このように広範囲な実験に対して高い水準で対応するためには、模擬視界装置やモーション装置、実時間システム環境などの基本性能が高いことと、それらがブラックボックスになっておらず、性能値が把握できていることが重要であることが分かった。すなわちそれは派手な革新的ハードウェアではなく、基盤的な不断の取り組みと技術的な誠意に対する期待ではないかと考える。

[執筆者紹介]



船引 浩平 略歴
 独立行政法人 宇宙航空研究開発機構
 研究開発本部
 飛行技術研究センター
 運行・安全技術チーム
 ヒューマンファクタセクションリーダー

1965年生まれ。早稲田大学理工学部、東京大学大学院工学系研究科修士課程を経て1991年に科学技術庁航空宇宙技術研究所（現宇宙航空研究開発機構）に入所。以降、パイロット・インターフェースの設計や評価などの航空人間工学に関する研究に従事。

目次

巻頭言

- 「不絶の取り組み」と「ソリューションの継続的な提供」1
取締役社長 下村 寛士

特別寄稿

- 研究用飛行シミュレータにとって大切なこと3
独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 研究開発本部 船引 浩平

論文

- ダイナミック歪み補正技術を用いた
フライト・シミュレータ用映像表示システムの開発5
山元 善明, 和田 博之, 星合 秀樹
- 並列処理と粒子モデルを導入した模擬視界発生
ソフトウェアの広領域化, 高リアリティ化9
竹田 和司, 川上 隆行, 林 隆伯, 若林 知行, 宮崎 正剛
- 訓練用シミュレータ向け模擬赤外線カメラ映像発生技術16
大川 和彦, 松本 律樹, 矢野 徹, 本庄 広一
- 環境配慮設計型自動車教習所向け模擬運転装置の開発23
栗田 弦太
- ボーン・スキニング方式適用人物モデルを用いた
鉄道シミュレータ向け人物動作表現技術27
練尾 正美, 竹田 和司, 川上 隆行, 鳥井 淳弘, 石崎 八月
- 術前計画型手術シミュレータの開発およびその臨床評価33
長坂 学, 高波 健太郎, 坂本 英男, 乾谷 徹, 本郷 新, 菊川 孝明, 寺田 尚史, 緒方 正人
- 超小型衛星向けホイール 0.4Nms タイプの開発43
田島 崇男, 須崎 祐多
- 低ノイズスイッチトキャパシタ CV-IC を適用した振動型MEMSジャイロ47
番 政広, 柴尾 新路, 内村 明高, 小林 健二, 福田 智洋, 中下 修治
- カメラ撮影パラメータの動的順位変更による車番認識システムの高速度化53
谷山 一彦, 林 健太郎
- 小規模ロック板式駐車場向け低価格集中精算機の開発59
佐々木 秀一, 金村 友樹, 長峯 光寛, 鈴木 秀一

ダイナミック歪み補正技術を用いたフライト・シミュレータ用映像表示システムの開発

山元 善明, 和田 博之, 星合 秀樹

要旨： 固定された曲面スクリーンに映像を投影するフライト・シミュレータにおいて、操縦に伴うパイロット視点位置の変化により発生する映像の歪みを解消するために、新たに考案した実時間で歪み補正を行うダイナミック歪み補正技術を用いた映像表示システムを開発した。開発したシステムでは、既に当社で実用化した静的な歪み補正映像発生方式に対して、歪み補正テーブル等を実時間で再計算する機能を付加し、視点位置の変化による映像の歪みを解消した。また、実際のフライト・シミュレータに開発したシステムを適用し、その有効性を確認した。

1 まえがき

動揺装置の外側にスクリーンを設置する（オフモーショ）方式のフライト・シミュレータでは、動揺装置の作動に伴い視点とスクリーンの相対位置が変化することによる映像の歪みが発生する。その歪みを解消するため、実時間で視点位置の変化に応じた歪み補正を施した映像を発生するダイナミック歪み補正（以下 D-NLIM^{*1} と呼ぶ）技術を開発し、D-NLIM 技術を用いた映像表示システムを開発した。以下、2 章で D-NLIM 技術の概要を、3 章で D-NLIM 技術を用いた映像表示システムの構成を述べ、4 章では、宇宙航空研究開発機構（以下 JAXA と呼ぶ）殿の回転翼機型飛行シミュレータに適用した例を紹介する。

2 D-NLIM 技術

2.1 歪み補正とは

球面スクリーン等の曲面スクリーンにプロジェクタにより映像を投影すると、映像が歪んで表示される。この歪みを解消するためには、プロジェクタより投影される映像にスクリーン位置・プロジェクタ位置・視点位置に応じた逆歪みをかける必要がある。この逆歪みをかけることを歪み補正と呼ぶ。

従来、この歪み補正を実現するためには、高価な歪み補正装置を付加するか、歪み補正機能付きのプロジェクタを使用する必要があった。

2.2 静的歪み補正の方式

当社においては、曲面スクリーンに対し連続した歪みのない映像を表示するための映像調整技術として映像発生装

置による映像補正技術（静的歪み補正）を開発・実用化してきた [1]。

映像発生装置による歪み補正の方式は、映像発生装置内部に、予め計測したスクリーン位置・形状、プロジェクタの設置位置及び基準視点位置のデータより作成した歪み補正テーブルを準備しておき、映像描画処理の後処理として、図 1 に示すように、描画バッファに作成された歪みの無い映像を、この歪み補正テーブルを使用し、歪み補正した映像にマッピングして出力することにより実現している。

本方式には、歪み補正機能付きプロジェクタ等を使用する従来の方式と比較して以下のような利点がある。

(1) 低コスト

高価な歪み補正装置や歪み補正機能付きプロジェクタを用いずに、低価格な汎用のプロジェクタが利用できる。

(2) 補正による画質の劣化の軽減

出力解像度より高い解像度で生成した映像から補正画像を生成できるため、画質の劣化が軽減する。

(3) 補正による遅れ時間の短縮

映像発生装置の通常の映像描画のフレーム（16ms）内で歪み補正処理を行うため、従来の方式で必要となる歪み補正処理にかかる時間（一般に 1/2 フレーム，8ms）を短縮できる。

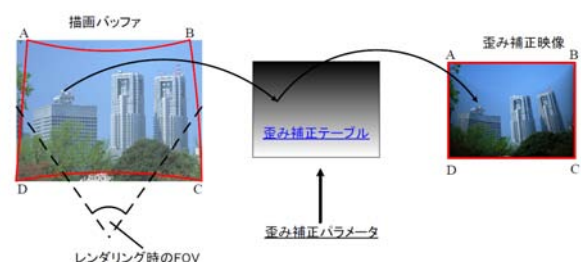


図 1 歪み補正テーブルによる歪み補正

^{*1} D-NLIM(Dynamic-Non Linear Image Mapping)

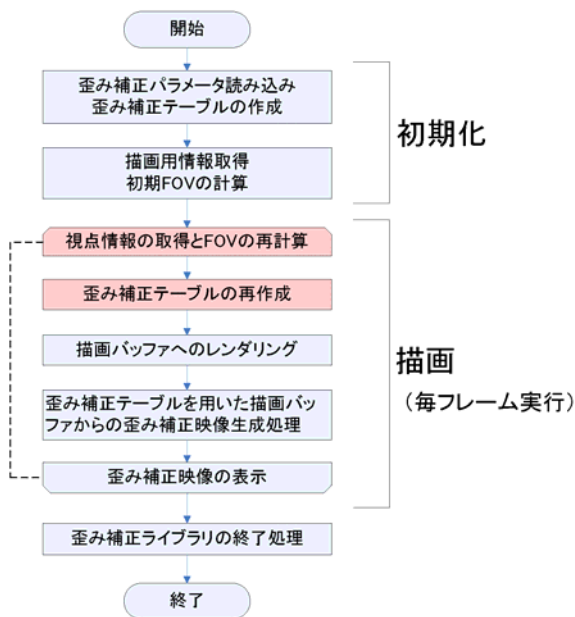


図2 D-NLIMの処理フロー

2.3 D-NLIMの方式

従来の映像発生装置による歪み補正では、事前に計算して保持していた歪み補正テーブルを用いて、静的な歪み補正を処理していた。D-NLIMでは、視点の変化量に応じて、実時間で歪み補正テーブルを再作成し、歪み補正処理を実施することで、スクリーンと視点の相対位置関係が変化するシステムにおいても、歪みが解消された違和感のない映像表示を可能とした。

図2にD-NLIMの映像発生装置内部での処理フローを示す。初期化時、動揺装置の中立位置（初期位置）を基準と算出された初期視点位置から、予め作成した歪み補正パラメータ及び歪み補正テーブルにより、初期FOVを計算する。その後、毎フレーム、ホスト計算機より与えられる動揺装置の移動量から、視点位置の変位量を計算し、その値をもとにFOVの再計算と歪み補正テーブルを再作成し、再作成された歪み補正テーブルを使用して歪み補正映像を生成する。本処理を60Hzフレーム間隔の映像描画フレーム内に納めることで、歪み補正の処理時間を短縮することができる。

3 D-NLIM技術を用いた映像表示システムの構成

3.1 映像表示装置の設置位置による相違点

一般に、動揺装置を使用するシミュレータにおいては、映像表示装置（ディスプレイまたはスクリーンとプロジェクタで構成）は動揺装置上に設置される（オンモーション方式）。

しかし、回転翼用シミュレータなどの高い没入感・臨場

感を得るために広視野の表示装置が必要な場合、表示装置を搭載するために大型の動揺装置が必要となる。さらに、大型ドームスクリーンのように、動揺装置に搭載できない大きさの映像表示装置を使用したい場合は、スクリーンを動揺装置の外側に設置する方式（オフモーション方式）を採用することになる。この方式の場合は、模擬操縦席部分も小型化でき動揺装置も小型のものを採用するなどシミュレータ全体の構成も簡易にできる利点がある。

映像表示装置の設置位置については装置の運用に応じて優先する点を考慮して方式を決定する必要がある。表1に2つの方式によるシミュレータの比較を示す。

オフモーション方式は、シミュレータ全体の構成を小型、単純にできる一方、映像の歪みについては以下に述べる技術的課題があった。

3.2 オフモーション方式の技術的課題

オンモーション方式の場合、動揺装置が移動しても映像表示装置と視点の相対的位置は変化しないため、予め設定した歪み補正の値のままで、映像に違和感が発生しない。

一方、オフモーション方式を使用した場合は、図3に示すように動揺装置の移動に伴い、スクリーンと視点の相対位置が変化する。この時、視点位置からスクリーンの表示領域を見た時の視野角（FOV）が変化する（1-2）が、歪み補正の値を変更しないと、視線上に表示されるべき物体は引き続きA1の位置に表示され、本来表示されるべき位置A2との間に誤差が生じる。この結果、視覚情報と動揺感覚に違和感が発生し、特に回転翼機のように動揺装置の運動が激しいシステムにおいては大きな問題となる。

3.3 解決策：D-NLIMの使用

3.2項に示した問題は、実時間で視点の移動に対応した歪み補正映像を発生できるD-NLIM機能を有する映像発生装置を使用してシステムを構成することで、解決可能である。図4にD-NLIM技術を用いた映像表示システムの構成を示す。

本構成のシステムにおいてD-NLIMが機能するためには、現在の視点位置・姿勢における基準視点位置・姿勢からの変化量（オフセット量）を計算するためにホスト計算

表1 スクリーン設置方式による比較

番号	方式	シミュレータ全体の構造	動揺装置（ペイロート）	表示装置
1	オンモーション	複雑	大型（4.5t程度）	制限あり（振動に耐える構造が必要）
2	オフモーション	単純	小型（1.5t程度）	大型、広視野が可能

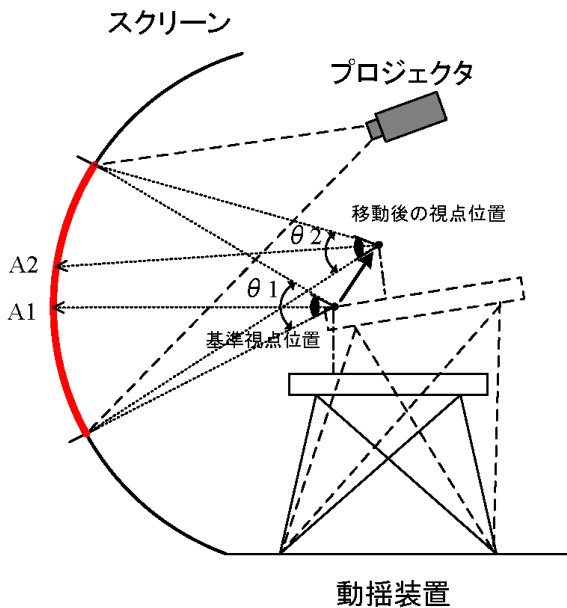


図3 視点位置移動時のFOVの変化

機より動揺装置の位置・姿勢情報を受け取る必要がある。ホスト計算機の動揺装置の位置・姿勢の算出方法としては、以下に示すものが利用できる。

- ① 動揺装置制御装置への指令値をもとに算出
- ② 動揺装置制御装置からのフィードバック情報をもとに算出

②は、実際の動揺装置の位置・姿勢を正確に反映することができるが、情報の映像発生装置への転送の遅延が発生する。一方、①は、遅延時間は最小ですむが、必ずしも動揺装置が指令値どおりに運動しない可能性がある。

どちらを使用するかは、構築するシステム全体の性能と要求により決定する必要がある。

また、さらに遅延時間を短縮する方法として、ホスト計算機により、動揺装置の位置・姿勢を予測演算により求める方法が考えられるが、計算のアルゴリズムやシステムへの組み込みは今後の課題である。

4 実際の適用例

JAXA 殿においては、数年来、当社製造の装置（映像表示装置を除く）を使用したオフモーション方式の回転翼機型飛行シミュレータが運用されてきたが、3.2項に示した問題を解消できないでいた。

2011年の回転翼機型飛行シミュレータを含むフライト・シミュレータ・システムの改修工事に際し、D-NLIM機能を有する当社製映像発生装置と動揺装置の位置・姿勢情報を取得・出力できるホスト計算機（飛行運動計算機）を採用していただき、評価の結果、運用に適する性能を有することが確認された [2]。

5 むすび

D-NLIM技術を用いた映像表示システムの構築方法を確立し、実際のフライト・シミュレータに適用し、運用者の高評価を得たことでシステムの有効性を実証することができた。

今後、高い没入感・臨場感が必要とするシミュレータにおいて大型スクリーン、小型の動揺装置、一般のプロジェク

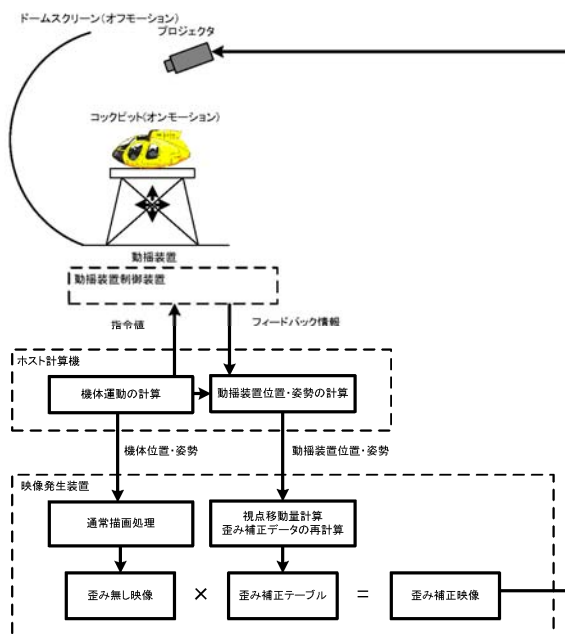


図4 D-NLIM技術を用いた映像表示システムの構成

タを採用したシステムを構築することが可能となった。

謝 辞

D-NLIM 技術の開発及び D-NLIM 技術を用いた映像表示システムの構築に際しては、JAXA 飛行技術研究センターの方々のご指導、ご支援、ご協力を頂き、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 和田博之，星合秀樹，“マルチプルショット・キャリブレーションによる広視野角映像表示システム”三菱プレジジョン技報，vol.5，pp.7-14，2010。
- [2] 若色薫，萩原敏正，和田博之，星合秀樹，“動的歪み補正を有するビジュアル・システムを使用した回転翼機型飛行シミュレータの開発”第 49 回飛行シンポジウム講演集，2011．RONBUNNO.2E1。

[執筆者紹介]



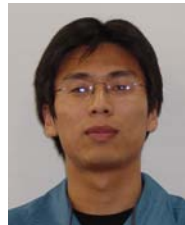
山元 善明 略歴

1985 年入社，主にシミュレーションシステムの基本設計・プロジェクト業務に従事。



和田 博之 略歴

2002 年入社，主にマルチプロジェクト表示技術およびコンピュータビジョン関連の研究開発に従事。



星合 秀樹 略歴

2002 年入社，主に表示装置設計および機構設計に従事。

並列処理と粒子モデルを導入した模擬視界発生ソフトウェアの 広領域化，高リアリティ化

竹田 和司，川上 隆行，林 隆伯，若林 知行，宮崎 正剛

要旨： 並列処理と粒子モデルを導入した模擬視界発生ソフトウェアを開発した。標高データをもとにオンラインで並列処理を活用して広領域の地形モデル（地形とテクスチャ）を生成し，生成した地形に沿って建造物の配置を自動的に行う技術を実現した。さらに粒子モデルを使用した気象模擬や特殊景況のリアリティの向上を図った。これにより実時間で連続的に広領域を飛行し，悪天候下や救難などのミッションリハーサルに対応することが可能となり，フライトシミュレータの有用性を高めることができる。

1 まえがき

従来，航空機関連の訓練シミュレータや研究開発用シミュレータにおいては専用の大型コンピュータを用いた CGI^{*1}方式で模擬視界映像を発生していた。その後，コンピュータ技術の発達により，シミュレータの模擬視界発生装置として汎用的なパーソナルコンピュータ（以下，PC）を用いることが一般的となってきた。筆者らも PC に自社開発の模擬視界映像を発生するソフトウェアを搭載した模擬視界発生装置を製品化し [1]，[2]，模擬視界発生装置の高機能・高性能化を継続して行いながら，各種航空機用シミュレータに適用してきた。これらの模擬視界発生装置は，例えば関東一円や東北地方など，限られた領域を模擬対象とした航空機用シミュレータに適用してきた。しかし近年，限定された領域の離着陸操縦訓練のみだけでなく，広領域の捜索訓練や，海外派遣でのミッションリハーサルなど，模擬領域の要求は日本全国ないしは全世界へと広範囲になってきている。そして訓練内容も高度化しており，気象や特殊景況（爆発，火災，ブラウンアウトなど）など，極めて実環境に近い模擬が求められてきている。

人間は外界の情報の 90% 以上を視覚から得ていると言われており，模擬視界発生ソフトウェアが生成する模擬視界映像のリアリティの向上は，シミュレータの高機能化，高性能化において非常に重要な項目である。筆者らは，シミュレータの高機能化，高性能化の要求に応えるため模擬視界発生ソフトウェアの開発を進めてきた。従来の模擬視界発生ソフトウェアの機能に加え，並列処理と粒子モデルを導入し，実在する広領域の地形を忠実に模擬する機能と気象や特殊景況のリアリティの向上を図った。広領域の模擬では，国土数値情報等のデジタルデータに基づいて地形標高データや詳細度の異なる地形モデルを，並列処理を活用し

て自動的かつリアルタイムに生成する手法を開発した。^{*2}そしてその自動的に生成された地形に沿って建物などを配置する技術も開発した。それに加え，粒子モデルを導入し雲の粗密や上空視野の表現，落雷および落雷に伴う輝度表現，積乱雲等の散乱表現などの機能を開発することで気象模擬の表現を向上した。さらに，従来アニメーション（オブジェクトの切り替え）で模擬していた特殊景況の表現を，物理現象を加味した粒子モデルを使用した手法で開発することでリアリティの向上を図った。また上記で開発した機能のパラメータを容易に編集できる DBGS^{*3}を構築した。

以下，2 章では地形の模擬，3 章で詳細地形の模擬，4 章で地物の配置，5 章で気象の模擬，6 章で特殊景況の模擬，7 章で DBGS，8 章で成果を報告する。

2 地形の模擬

地形の模擬とは，建物や他の機体などを除いた地表面の模擬を指す。開発した模擬視界発生ソフトウェアでは，画面に表示される地面の起伏は地形ポリゴンとして模擬する。また山岳部や都市部などを模した表面上の模様は地形テクスチャとして模擬する。更にこれらの生成や読出などのリソース管理機能と連携させることで実時間での広領域連続模擬を実現している。

筆者らはこれまでの開発により，オフラインで生成した標高データを基に，視点との距離や地形起伏に応じた動的な LOD^{*4}を適用し地形ポリゴンを模擬することを実現した [3]，[4]。地形の生成方法および動的な管理方法，また地形テクスチャの模擬について以下に説明する。

^{*2} この映像の作成に当たっては，国土地理院長の承認を得て，同院発行の数値地図 50m メッシュ（標高）を使用した。（承認番号 平 2 4 情使，第 5 8 8 号）

^{*3} DBGS : Data Base Generation System, データベース作成システム

^{*4} LOD : Level Of Detail

^{*1} CGI : Computer Generated Imagery

2.1 地形の生成方法および動的な管理方法

広領域の連続模擬を考慮する場合、地形モデル作成時間やコストの増大、データ量の増大による表示能力不足や記憶容量不足などが問題となる。そこで筆者らは、図1に示す地形の生成方法および動的な管理方法を実装した。この方法は、普遍的なデータは全てオフラインで自動的に生成し、必要なデータはオンライン時に随時生成する。また不必要なデータは随時解放する。これにより作業員による地形生成作業を不要にするとともに、全世界の連続的な模擬を可能とする。

2.2 地形テクスチャの模擬

地形テクスチャの模擬において、1[km]四方の領域を1[m/画素]のテクスチャで利用する場合、必要なメモリ領域は4[MB]となる。同様の分解能で模擬を行う場合、40[km]四方で6GB程度となり市販のグラフィックボードのメモリ容量を超えてしまい、広領域の模擬を実現できない。

そこで開発した映像発生装置は、距離に応じて段階的に分解能の異なる地形テクスチャを複数用意し、実行時に動的に合成して表示する手法を開発した。複数の分解能テクスチャの合成処理を図2に示す。このとき、視点と地形の距離が近い場合には分解能の高いテクスチャを選択し、視点との距離が大きくなるに従い徐々に分解能の低いテクスチャに切り替わるように合成する。4096x4096画素(64[MB])のテクスチャを利用した場合、最高1[m/画素]から8レベル分で512[km]四方を包含する。このときのメモリ使用量は512[MB]程度であり、固定読込の場合に比べ圧倒的に少ないメモリ消費で模擬が可能である。固定読込と動的合成方式におけるメモリ容量の比較を表1に示す。

2.3 地形テクスチャの動的更新

開発した映像発生装置では、地形テクスチャの元となる航空写真/衛星写真データを予め微小領域に分割して保存しデータベース化する。視点の移動に伴う地形テクスチャの更新処理を図3に示す。視点位置の移動に伴い発生した新

規読出し分を、移動に伴い不要になった破棄分の画像に上書きする形で読出していく。こうして更新したテクスチャを視点の中心が一致するよう座標オフセットを加えて合成に利用する。またこのとき、更新領域の判断、データの読み出しには並列処理技術によるバックグラウンド処理を利用し、描画処理のテクスチャ更新に伴う待機時間を最小にとどめる。

3 詳細地形の模擬

シミュレータの運用上、特に重要な領域に対し周囲よりさらに高い分解能の地形メッシュを利用することで、より詳細に模擬を行うことをインセット機能と呼ぶ。以下に地形ポリゴンと地形テクスチャのインセット機能について説明する。

3.1 地形ポリゴンのインセット機能

開発した模擬視界発生ソフトウェアでは、予め指定した地点のポリゴンの再帰分割を制御し、異なる分解能の地形データを合成することが可能である。また詳細設定領域に

表1 固定読込と動的合成方式におけるメモリ容量

	40km 四方	512km 四方
固定読込	40*40*4MB≒6GB	512*512*4MB≒1000GB
動的合成	5レベル*64MB≒0.3GB (320MB)	8レベル*64MB≒0.5GB (512MB)

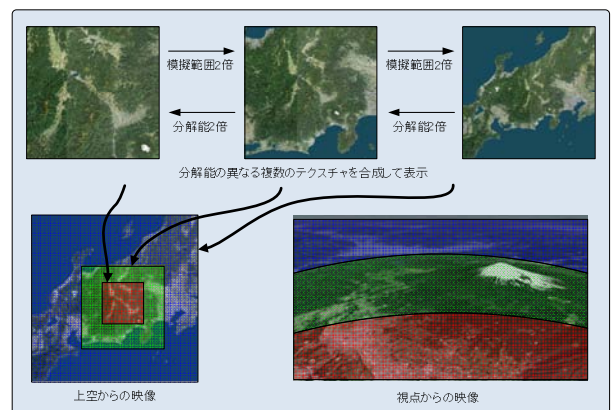


図2 複数の分解能テクスチャの合成処理

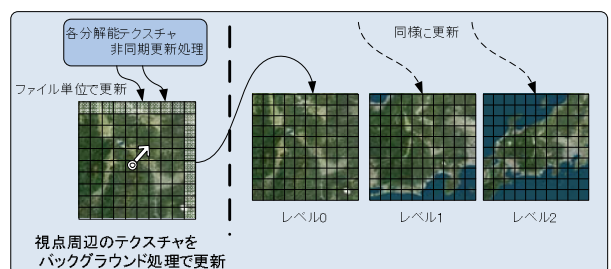


図3 視点の移動に伴う地形テクスチャの更新処理

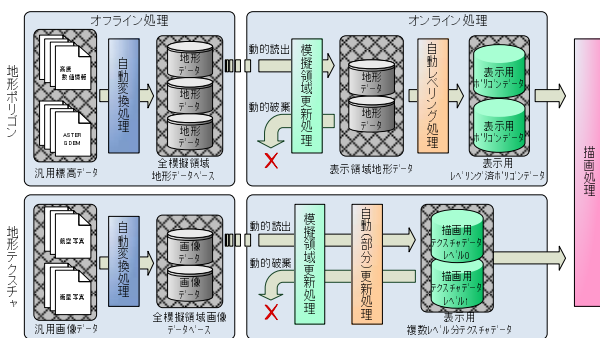


図1 地形の生成方法および動的な管理方法

対して異なる分割パラメータを設定し、周囲よりも細かく分割されるよう制御することも可能である。地形ポリゴンのインセット機能の例を図4に示す。

3.2 地形テクスチャのインセット機能

詳細な模擬を行うテクスチャデータは容量が膨大となるため、必要な領域のデータだけ用意する。開発した模擬視界発生ソフトウェアは、地形テクスチャの動的読み込み時に詳細テクスチャの有無を判断し自動的に合成処理を行う。地形テクスチャのインセット機能の例を図5に示す。

4 地物の配置

シミュレータを用いた訓練において、離着陸の対象となる飛行場や目標物となる建物などのモデルの模擬は欠かすことができない。従来これらのモデルは地形ポリゴンにフィットするよう予め調整し作成していた。開発した模擬視界発生ソフトウェアは、模擬範囲の広領域化に伴い地形データを動的に生成する。このため、こうして生成した地形に対し、飛行場や建物のようなモデルを不自然な隙間を生じないように配置する動的な配置機能が必要となる。開発した映像発生装置は、用途に応じてポイントフィーチャー、リニアフィーチャー、サーフェスフィーチャー、エアリアルフィーチャーの4種類の配置方法を実装した。それぞれの手法による配置例を図6に示す。

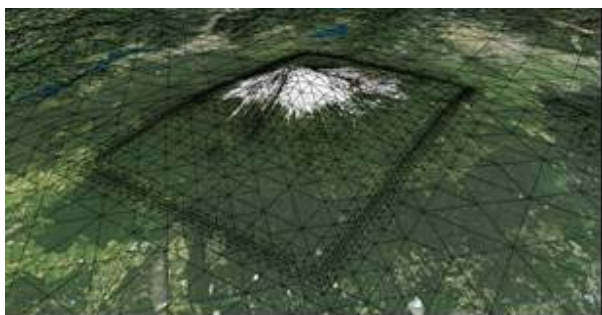


図4 地形ポリゴンのインセット機能



図5 地形テクスチャのインセット機能

4.1 ポイントフィーチャー

ポイントフィーチャーの配置例を図6(a)に示す。ポイントフィーチャーは任意のモデルを地形に接地した状態で配置する機能で、主に建物モデルの配置に利用する。モデルの原点緯度経度や方位角などをパラメータとして与えれば、地形の標高に合わせてモデルの高度が自動的に更新し、表示を行う。

4.2 リニアフィーチャー

リニアフィーチャーの配置例を図6(b)に示す。リニアフィーチャーは指定した線分上にテンプレートモデルを連続的に配置する。このとき地形ポリゴンに合わせて自動的に分割、変形する。道路や河川、送電線などの模擬に利用する。

4.3 サーフェスフィーチャー

サーフェスフィーチャーの配置例を図6(c)に示す。サーフェスフィーチャーは任意のモデルを地形に接地した状態で配置する。配置するモデルは関係する地形のポリゴン毎に分割し、モデル座標系の高度をポリゴン平面からの垂直オフセットに置き換えて表示する。

4.4 エリアルフィーチャー

図6(d)にエアリアルフィーチャーの配置例を示す。エアリアルフィーチャーは指定した領域内にテンプレートモデルを連続的に配置する。対象となる地形ポリゴンの標高に合わせて、モデルに含まれるオブジェクト単位に地形の標高値を参照し表示を行う。

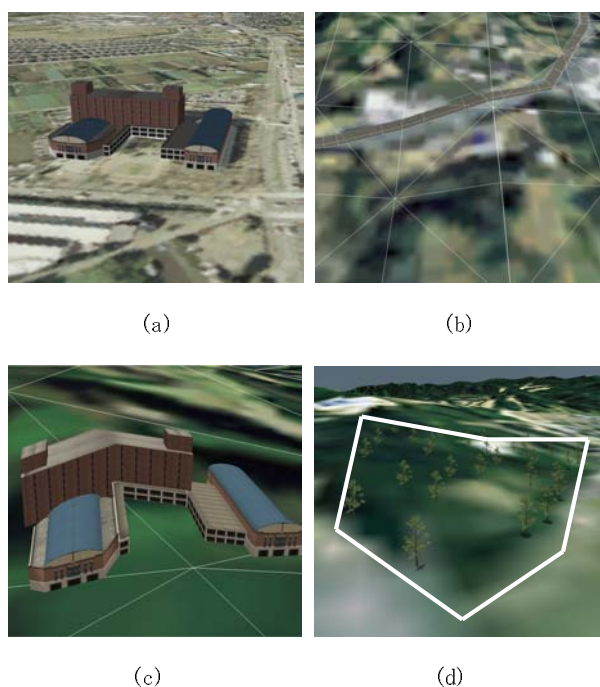


図6 フィーチャーによる地形の配置例

(a) ポイントフィーチャー, (b) リニアフィーチャー, (c) サーフェスフィーチャー, (d) エリアルフィーチャー

4.5 フィーチャーモデルによる地形の変形機能

4.1～4.4 項のフィーチャー機能は、配置するモデルを動的な地形に合わせて移動、変形するもので、空港モデルなどの任意高度、任意平面上で模擬したい物体の配置は困難である。開発した模擬視界発生ソフトウェアは、モデル内の特別な定義を持つポリゴンを基に、動的に生成された地形を切断、変形する機能を持たせることで任意高度、任意平面上への配置を実現した。この地形変形機能を用いた配置例を図 7 に示す。空港モデル境界で地形データを切断するための CUTTER ポリゴン、空港をモデリングした平面に切断した境界を修正する FLATTERN ポリゴンを定義し、空港モデルの任意標高、任意平面への配置を実現している。



図 7 地形変形機能を用いた配置例

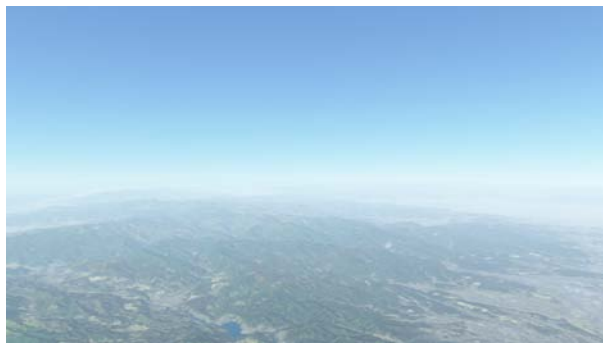


図 8 大気の模擬表示例



図 9 層雲の模擬表示例

5 気象の模擬

気象の模擬では、粒子モデルを活用した雲の粗密や上空視野の表現、落雷および落雷に伴う輝度表現、積乱雲等の散乱表現などの機能について開発した。

5.1 大気の模擬

大気の模擬表示例を図 8 に示す。大気の模擬は日時および視点位置の緯度経度より太陽の位置を算出する。そして求めた太陽の位置に応じて太陽の色、空の色分布 (Rayleigh 散乱) と物体との視点位置の距離に応じた大気散乱による遠近感効果 (Mie 散乱) を計算 [5] し、大気の模擬を行う。

5.2 雲の模擬

雲の模擬は、大きく分けて層雲、積雲の二種類を模擬する。

層雲の模擬表示例を図 9 に示す。層雲は、複数の異なるノイズテクスチャを組み合わせることで自然な層雲の形状、厚みを模擬する。そして視点位置から太陽方向における雲の厚みを求め、その厚みに対して光散乱を計算することで層雲を模擬する。

積雲の模擬表示例を図 10 に示す。積雲は、指定した領域内に粒子を発生し、その粒子をビルボードとして描画を行い、そのビルボードに雲を模したテクスチャを貼ることでリアリスティックな積雲の表現 [6] を可能とする。そして積雲を太陽に近い側、中間、裏側と 3 つグループに分け、太陽に近い側は明るい平行光源で照らし、裏側は暗い平行光源で照らすことで陰影を表現する。

5.3 降雨、降雪の模擬

降雨の模擬表示例を図 11 に示す。降雨、降雪の模擬は粒子モデルを使用して表現する。

粒子の落下運動の処理に、「ストークス方程式 (ストークスの式, Stokes equations)」 [7] を使用する。ストークスの式は、小さな粒子が流体中 (空気中) を落下するときの終端速度 (落下速度) を求める際に使用される方程式である。空気中を落下し始めた粒子 (雨粒) は、徐々に速度を増し、

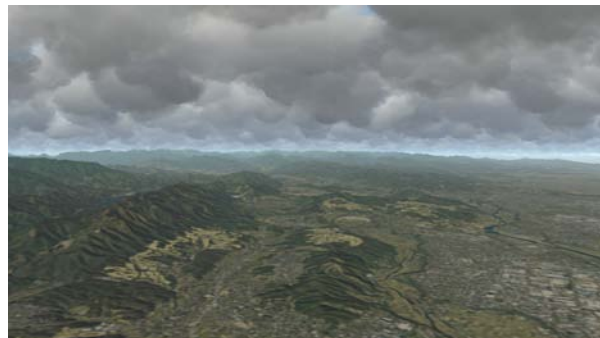


図 10 積雲の模擬表示例

やがて一定の速度となる．その速度を雨粒の落下速度とし，その速度に応じて模擬する雨粒の大きさを変更することで雨脚を模擬する．

5.4 雷の模擬

雷の模擬表示例を図 12 に示す．雷の模擬は，実行中にフラクタルパターンを用いて雷形状の生成する．指定した雷の始点座標，終点座標および各種パラメータより，雷形状を実時間で生成する．生成した雷形状を基に太さを持った線として描画し，その描画結果に対してグロー処理を行い空中への放電効果の模擬する．また雷光は地形，移動物体，雲に対しての影響を模擬する必要がある．雷から近いオブジェクトに関しては，グロー処理によるポストエフェ



図 11 降雨の模擬表示例



図 12 雷の模擬表示例

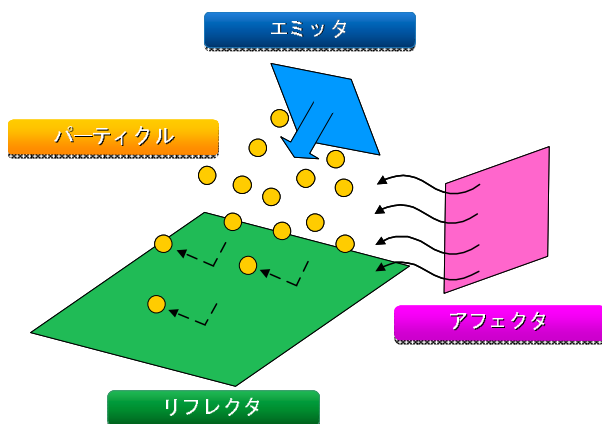


図 13 パーティクルシステムの構成

クト効果により雷光の効果の重畳が期待できる．しかし，雷から遠いオブジェクトに関しては，そのオブジェクトへの光源計算が必要となる．そこで雷光の効果は事前に計算したオブジェクトの奥行き値を参照しポストエフェクトにより雷光の効果を反映する．

6 特殊景況の模擬

従来，特殊景況はアニメーション（オブジェクトの切り替え）で表現していた．しかし，アニメーション手法では事前に作成した現象（運動）しか模擬できない．このため，煙を模擬したアニメーションでは，風量，風向などが変化する場合，その影響を反映することが困難であった．筆者らは特殊景況の模擬を，外的要因による影響を反映できるように粒子モデルを使用したパーティクルシステムとして開発した．

6.1 パーティクルシステム

パーティクルシステムを使用して爆発，火炎，ブラウンアウトなどの特殊景況を模擬する．パーティクルシステムの構成を図 13 に示す．パーティクルシステムは，パーティクル，エミッタ，リフレクタおよびアフェクタから構成する．パーティクルはエミッタから放出される粒子を指し，放出されたパーティクルにリフレクタおよびアフェクタが影響を与えることで粒子の模擬を行う．

パーティクルは，粒子のことを指す．パーティクルをエミッタと呼ばれるオブジェクトから発生させることで，煙，炎，ブラウンアウトなどさまざまな特殊景況を模擬する．パーティクルは自身の位置を基に視点方向に対して垂直となるビルボードとして描画する．そしてビルボードに模擬対象となる煙や炎などのテクスチャを貼り付けることで特殊景況を表現する．

エミッタはパーティクルの発生源オブジェクトである．パーティクルの分布形状はエミッタに依存する．そこで，複数の放出形状を持つエミッタを用意する．リフレクタとはパーティクルを跳ね返す遮蔽物である．リフレクタは各種パラメータと衝突判定に用いる面情報から成り立つ．パーティクルがリフレクタに衝突した場合，予め設定された事象をパーティクルに反映することが可能である．

アフェクタはパーティクルに対して風などの外力を与えるオブジェクトである．

6.2 ブラウンアウト

ブラウンアウト（英: brown-out）を例としてパーティクルシステムの設定例を図 14 に，ブラウンアウトの模擬表示例を図 15 に示す．ブラウンアウトとは，ヘリコプターの回転翼から発生するダウンウォッシュ（下向きの気流）により地面の砂塵が舞い上がり，パイロットの視界を奪ってしま

う現象である．パーティクルシステムを使用しこの現象を模擬する．ヘリコプターの回転翼にエミッタをアタッチする．そして砂地などの地表にリフレクタを配置する．パーティクルには煙の形状を模したテクスチャおよび砂を模したカラーテーブルを適用した．

7 データベース作成システム

DBGS の実行画面を図 16 に示す．模擬視界発生ソフトウェア用の DBGS は，地形，地形用テクスチャ，ベクタフィーチャ，移動物体，シナリオなどデータベースの表示および編集機能を提供する．本 DBGS は，模擬視界発生ソフトウェアを内包しているため，DBGS 内のウィンドウに模擬視界発生ソフトウェアが表示する模擬映像と同等の描

表 2 開発した成果一覧表

比較機能	開発後
地形模擬範囲	全世界
地物自動配置	有
大気模擬	Rayleigh 散乱と Mie 散乱による模擬
雲の模擬	ノイズテクスチャを使用し散乱を考慮 粒子モデルによる表現
降雨降雪の模擬	粒子モデルによる表現
雷の模擬	フラクタルによる実時間生成
特殊景況の模擬	粒子モデルによる表現

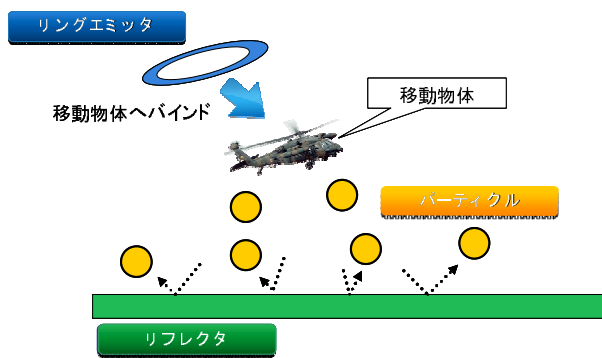


図 14 パーティクルシステムの設定例



図 15 ブラウンアウトの模擬表示例



図 16 DBGS の実行画面

画結果を表示可能である．またホストコンピュータのエミュレータと通信制御部を内包するため，本 DBGS だけで模擬視界発生ソフトウェアと通信制御部およびホストコンピュータの接続をエミュレーションすることも可能である．編集機能はグラフィカルなユーザーインターフェースを採用しており，移動物体等の位置や姿勢をマウスによって直感的な操作で編集することができる．また，地形および地形用テクスチャデータベースの作成については，対話形式の作成機能により，日本全国ほどの範囲であれば数時間で半自動的に作成が可能である．地形データベースを作成するために必要となる標高データ形式は ASTER GDEM[8] に対応しているため，全世界の地形の作成が可能である．

8 成果

今回開発した成果を表 2 に示す．これにより実時間で連続的に広領域を飛行し，悪天候下や救難などのミッションリハーサルに対応することを可能とした．

9 むすび

本稿では，開発した模擬視界発生ソフトウェアの広模領域の地形模擬，詳細地形の模擬，気象模擬，特殊景況の模擬，DBGS について述べた．忠実な模擬を実時間でかつ高精細・高品質な映像で実現することができた．開発した模擬視界発生ソフトウェアは，航続距離が長く航空救難などに対処する救難ヘリコプターや潜水艦の探知と周辺海域の警戒監視・哨戒，遭難船舶の搜索等の多様な任務を行う哨戒機などのシミュレータに適用する予定である．今後，高度化する訓練を実現するために，より忠実で実環境に近い模擬を可能とする模擬視界発生ソフトウェアの開発を継続して行う予定である．

参考文献

- [1] 宮崎正剛, 若林知行, 矢野徹, 川上隆行, “PCIG Di-aScene IG-95/80 の開発,” 三菱プレシジョン技報, vol.2, pp.44-50, 2006.
- [2] 若林知行, 川上隆行, “広域地形モデルの生成と表示技術,” 三菱プレシジョン技報, vol.5, pp.25-30, 2010.
- [3] 梶原景範, “シミュレータ用高性能模擬視界装置の研究-地形モデルの生成と表示,” 第 13 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス Sess. 11-3, 1994. Sess.11-3.
- [4] 梶原景範, “実時間シミュレータ用地形モデルの生成と表示の一方法,” 第 14 回シミュレーション・テクノロジー・コンファレンス Sess.7-13, 1995.
- [5] A.J.Preetham, P. Shirley, and B. Smits, “A Practical Analytic Model for Daylight,” SIGGRAPH 1999, Computer Graphics Proceedings Sess.7-13, 1999.
- [6] N. Wang, “Realistic and Fast Cloud Rendering in Computer Games,” In Proceedings of SIGGRAPH 2003 Sess.7-13, 2003.
- [7] 楽詠, 岩崎慶, 陳炳宇, 土橋宜典, 西田友是, “雲微物理を考慮した雨雲形成のビジュアルシミュレーション,” Visual Computing / グラフィクスと CAD 合同シンポジウム, 2009.
- [8] T.Tachikawa, M.Hato, M.Kaku, and A.Iwasaki, “The characteristics of ASTER GDEM version 2,” IGARSS, July 2011.

[執筆者紹介]



竹田 和司 略歴

2000 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.



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.



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ソフトウェア開発に従事.



若林 知行 略歴

1989 年入社, 主に実時間コンピュータグラフィックスの関連の製品開発に従事.



宮崎 正剛 略歴

1979 年入社, 主に計算機システムの開発を経て, コンピュータグラフィックス関連の製品開発に従事.

訓練用シミュレータ向け模擬赤外線カメラ映像発生技術

大川 和彦, 松本 律樹, 矢野 徹, 本庄 広一

要旨： 訓練用シミュレータにおける赤外線カメラ映像を模擬するための映像発生装置について、専用のハードウェアを追加せずに汎用グラフィックス・ボード上の機能だけで映像を発生する技術（以後、本論文ではIRIGと呼ぶことにする）を開発した。従来のIRIGでは、画像処理部分の模擬を実施するのに専用の画像処理ボードを使用しなければ30Hzの画像更新レートを実現できなかったが、本技術では、画像処理部分も汎用グラフィックス・ボード上の機能だけで処理を行い、かつ、30Hzの画像更新レートを実現可能にした。汎用グラフィックス・ボード上の機能だけで処理を実現することで、将来への拡張性や互換性を維持できる。

1 まえがき

近年の航空機や戦車などの実機には、FLIR^{*1}に代表される赤外線カメラ映像を画像処理して表示する装置（以後、本論文では赤外線映像装置と呼ぶことにする）が搭載されている。これに伴い訓練用シミュレータにおいても、赤外線カメラ映像を模擬するIRIGが必要になってきている。これまで当社の訓練用シミュレータでは、IRIGが必要な場合、海外製のIRIGを利用してきた。しかし、海外製IRIGには以下のような欠点があった。

- 通常の映像発生装置と比較して購入価格が高い
- ブラックボックスであるため顧客要求によるカスタマイズが不可能である
- 故障修理の場合海外に送り返す必要があり、輸送費がかかり、かつ、修理期間も長くなる

これらの欠点を改善するため、自社製品のIRIGの開発が必要になった。

可視光の窓外視界を模擬する映像発生装置とIRIGを比較すると、一般的には以下のような点が異なっている。

- 物体を観測する場合、通常の映像発生装置で模擬する可視光の波長領域では物体からの反射が支配的であるのに対して、IRIGが模擬する赤外線の波長領域では物体からの放射が反射よりも大きな影響を持っている。このため、IRIGではピクセルの色を計算する処理（レンダリング）部分を、可視光を扱う映像発生装置とは異なる物体の放射輝度を扱った計算式に置き換える必要がある。
- 通常の映像発生装置では人間の目が直接見る光景を模擬するのに対し、IRIGは赤外線カメラの映像を模擬す

るため、カメラ特有のノイズ・ボケといった映像品質劣化の模擬、及び、カメラの撮像素子後段で実施される映像の明るさやコントラストの調整といった画像処理を追加する必要がある。

これらの部分を、どう実現するかがIRIG開発の課題である。

海外製IRIGではこの課題を解決するために、専用のハードウェアを搭載している。しかし、専用ハードウェアを使用してしまうとコストアップとカスタマイズの容易性が失われる。従って、我々が開発する技術は、専用ハードウェア使用せずに課題を実現することを目標とした。実装方法を検討した結果、最近のグラフィックボードに搭載されているGPU^{*2}で高速並列演算を実行するシェーダプログラムを適用することで課題を解決可能であると判断した。

以下、2章で本技術で使用したシェーダプログラムの処理概要について、3章でシェーダプログラムにおけるレンダリング処理について、4章でシェーダプログラムにおける映像品質模擬について、5章でシェーダプログラムにおける画像処理について述べる。

2 本技術で使用したシェーダプログラムの処理概要

本技術は、主に以下の機能からなる。

- 幾何計算
- レンダリング
- 映像品質模擬
- 画像処理

このうち、シェーダプログラムを適用したのは、レンダリング、映像品質模擬、及び、画像処理の機能である。幾何計算では以下の処理を実施する。

* IRIG : InfraRed Image Generator

*1 FLIR : Forward Looking InfraRed

*2 GPU : Graphics Processing Unit

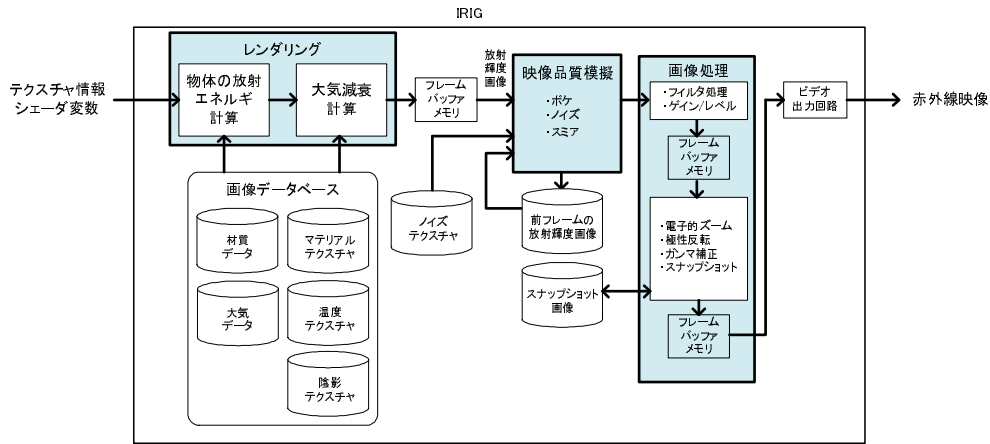


図1 シェーダプログラムの処理フロー

- カリング：視界に入る物体を選択する。
- レベリング：視点と物体の距離に応じて簡易なモデルから詳細に模擬したモデルの中から一つを選択する。
- ソート：半透明の描画を正しく行うため視点からの距離が遠い物体からレンダリングできるように並び替える。
- 座標変換：物体を構成する面の頂点座標を2次元の描画面へ投影する。
- クリッピング：座標変換した物体を構成する面を描画領域の端で切る。

これらについては、通常の映像発生装置と IRIG に大きな違いは存在しないので本論文では詳細な説明を省略する。図1にシェーダプログラムの処理フローを示す。以後の章で各処理の実装について述べる。

3 シェーダプログラムにおけるレンダリング処理

本技術におけるレンダリングとは、赤外線カメラの撮像素子に入射するピクセル毎の放射輝度を計算する処理である。レンダリングは大きく以下の2つに分けられる。

- 物体が放射する放射輝度の計算
- 物体が放射する輝度が赤外線カメラに到達するまでに大気によって減衰する計算

以下にそれぞれの処理について記述する

3.1 放射輝度計算

訓練用フライトシミュレータに使用する IRIG では、厳密に物体が放射する放射輝度計算するのではなく、決められた映像更新の時間内に模擬映像の生成を完了させるため簡易化した計算式を使用する。本技術で使用している物体が放射する放射輝度の計算モデルを図2に示す。また式(1)に放射輝度計算の数式を示す。式(1)の左辺第1項は太陽の反射輝度、第2項は太陽や天空から吸収したエネルギー

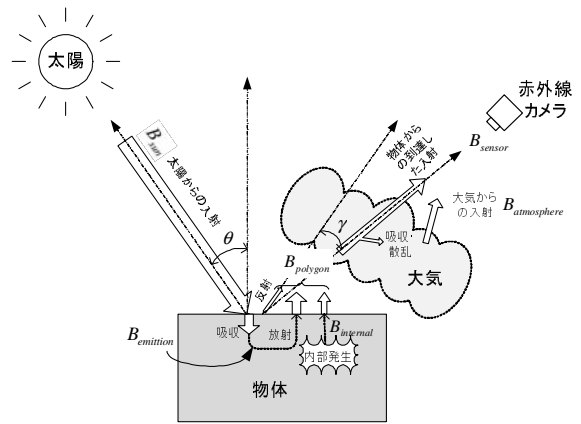


図2 物体が放射する放射輝度の計算モデル

を放射する際の放射輝度、第3項はエンジン等物体内部で発生した熱による放射輝度である。

$$B_{polygon} = \varepsilon_{sfc}(\gamma)B_{sun} + B_{emission}(\theta, T_{air}) + B_{internal}(T_{sfc})B_{polygon} \quad (1)$$

- $B_{polygon}$ 物体の放射輝度
- B_{sun} 太陽放射
- $B_{emission}(\theta, T_{air})$ 材質毎の太陽の入射による物体の放射輝度
- $B_{internal}(T_{sfc})$ 材質毎の内部発生した熱による放射輝度
- $\varepsilon_{sfc}(\gamma)$ 材質毎の物体表面の反射率
- γ 太陽光の反射方向と物体見た赤外線カメラの方向がなす角度
- θ 太陽光の入射方向と入射面の法線がなす角度
- T_{air} 気温
- T_{sfc} 物体の表面温度

太陽光の入射方向、物体から見た赤外線カメラの方向、及び、気温は訓練条件から与えられる。式(1)の各係数はそれらのパラメータを元に算出できるよう、予め DBGS^{*3}を使って材質データとしてテーブル化してある。DBGSとは、地形や物体の形状とそれらを構成する面の色や模様に関する情報をオフラインで作成するシステムである。DBGSの専

*3 DBGS : DataBase Generation System

用プログラムに、物質の分光反射率と比熱、地表に届く太陽の分光放射強度、気温、水蒸気量等を入力することで、IRIGが必要とする材質データが作成できる。運用中は、昼間・薄暮・夜間の時間帯と、それぞれの時間帯における晴天・曇天・雨天の天候パターンの合計9パターンの材質データがIRIGにロードされる。

3.2 大気減衰計算

物体から赤外線カメラに向かう放射輝度は、大気の影響により物体から赤外線カメラまでの距離に応じて減衰する。式(2)に赤外線カメラで観測する物体の放射輝度と物体から赤外線カメラに向かう放射強度の関係を示す。

$$B_{sensor} = (1 - \tau^*)B_{atm} + \tau^* B_{polygon} \quad (2)$$

B_{sensor} 赤外線カメラが物体から受光する放射強度

$B_{polygon}$ 物体から赤外線カメラ方向に向かう放射強度

B_{atm} 大気の放射強度

τ^* 大気平均透過率

式(2)の左辺第1項は物体から赤外線カメラまでの光路間に存在する大気が放射する放射輝度、第2項は光路間に存在する大気の影響で減衰する物体の放射輝度である。大気の放射輝度 B_{atm} は物体の放射輝度計算で使った物体の放射強度や入射強度と同様、予めDBGSで計算しておく。式(3)に大気平均透過率と赤外線カメラまでの距離の関係を示す[1]。

$$\tau^* = \exp(-\alpha \cdot r) \quad (3)$$

α 大気の減衰係数

r 面と赤外線カメラの距離

式(2)に式(3)を代入し、式(4)を得る。

$$B_{sensor} = \exp(-\alpha \cdot r) B_{polygon} + (1 - \exp(-\alpha \cdot r)) B_{atmosphere} \quad (4)$$

訓練用シミュレータの場合、教官が赤外線カメラ映像の視程を訓練条件として直接指示することが多い。式(5)に、訓練条件として与えられた視程 R から大気の減衰係数を計算する式を示す[2]。

$$\alpha = R \log 0.02 \quad (5)$$

本技術では、大気減衰計算を終えた画像をいったんフレームバッファに書き込み、その内容をテクスチャに変換して後段の処理に送る。

4 シェーダプログラムにおける映像品質模擬

加工を実施していない赤外線カメラ映像は、ノイズやボケで画像が劣化している。本論文では、この画像劣化に関する模擬を実施している部分を映像品質模擬と呼ぶ。

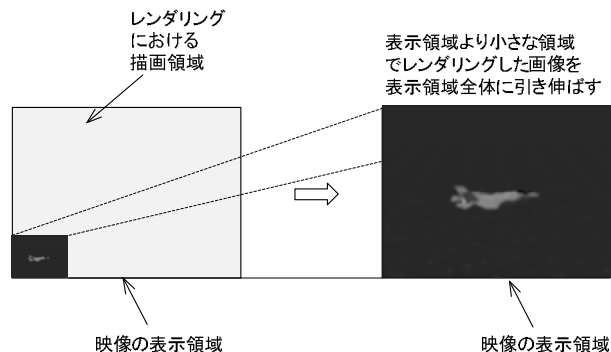


図3 ボケの模擬方法



(a) ボケを模擬しなかった時の画像



(b) ボケを模擬した時の画像

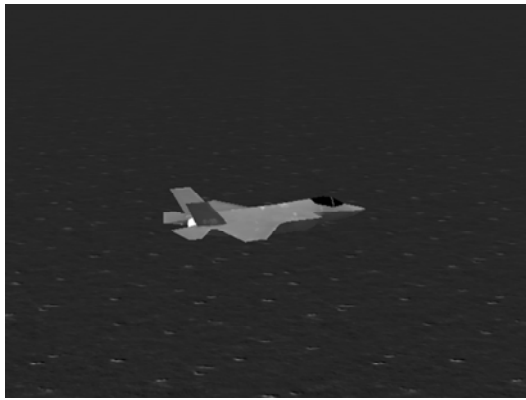
図4 画像のボケのサンプル画像

4.1 ボケ

ボケは、グラフィックス・ボードが持っているテクスチャのフィルタ機能を利用して作成している。図3にボケの模擬方法を示す。レンダリングの際に最終的なビデオ出力するピクセル数よりも小さい領域に画像を作成しそれをテクスチャに変換する。映像品質模擬機能の入力時にレンダリング結果のテクスチャを引き延ばすと、テクスチャのフィルタ機能によりボケた画像となる。図4に画像のボケのサンプル画像を示す。図4の(a)がボケを模擬しなかった時の画像で、図4の(b)がボケを模擬した時の画像である。

4.2 ノイズ

本技術では起動時に一度だけノイズパターンのテクスチャ(ノイズテクスチャ)を作成しておき、ノイズテクス



(a) ノイズを付加しなかった時の画像



(b) ノイズを付加した時の画像

図5 ノイズのサンプル画像

チャのテクスチャ座標にフレーム毎に発生した乱数を加算することで、ランダムな映像ノイズを模擬している。この方式にすることで、乱数発生に必要な時間を短くできる。図5にノイズのサンプル画像を示す。図5の(a)がノイズを付加しなかった時の画像で、図5の(b)がノイズを付加した時の画像である。

5 シェーダプログラムにおける画像処理

赤外線映像装置では、ゲイン・レベル・極性反転といった画像の加工を実施している。本論文ではIRIGのこの部分に関する模擬を画像処理と呼ぶ。

- フィルタ処理
- ゲイン・レベル
- モーション・ブラー
- 電子的ズーム
- 極性反転
- ガンマ補正
- スナップショット取得・表示

5.1 フィルタ処理

本技術において、処理対象となっているピクセルに対し、ある程度の割合（重みづけ）で周辺のピクセルの輝度値を

I_b : 処理対象ピクセルの輝度値
 I_{r_1} : 処理対象ピクセルの周囲のピクセルの輝度値
 W_{r_1} : 処理対象ピクセルの添字位置に対応する重み

I_b	I_{r_1}	I_{r_2}
I_{r_1}	I_b	I_{r_2}
I_{r_2}	I_{r_1}	I_b

ピクセルの輝度値

W_{r_1}	W_{r_2}	W_{r_3}
W_{r_2}	W_{r_1}	W_{r_3}
W_{r_3}	W_{r_2}	W_{r_1}

重みづけのテーブル

図6 ピクセルの輝度値と重みのテーブル

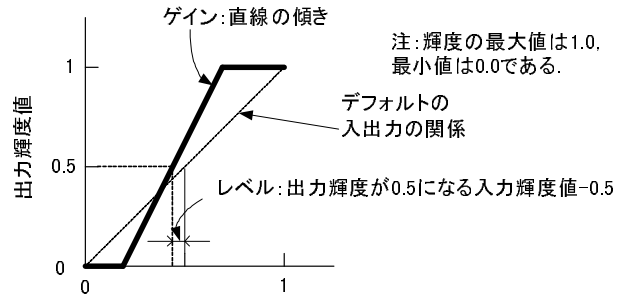


図8 ゲイン・レベルの入出力輝度の関係

加算する処理をフィルタ処理と呼んでいる。輝度の重みづけを変更することで、スムーズ化、エッジ抽出、エッジ強調といった表現が可能である [3]。図6の様に並んだピクセルの輝度値と重みのテーブルに式(6)の演算を実施することでフィルタ処理後のピクセル輝度値は計算できる。図7にフィルタ処理のサンプル画像を示す。図7の(a)は元の画像の一部を拡大したもので、図7の(b)がスムーズ化のフィルタ処理の結果、図7の(c)がエッジ抽出のフィルタ処理の結果、図7の(d)がエッジ強調のフィルタ処理の結果である。

$$I_{out} = \sum_{i=0}^8 W_i I_i \quad (6)$$

I_{out} フィルタ処理後のピクセル輝度値

5.2 ゲイン・レベル

画像の明るさやコントラストを変更するのがゲイン・レベルの機能である。図8にゲイン・レベルの入出力輝度の関係を示す。本技術ではゲインを直線の傾き、レベルを中間値を出力する入力値がデフォルトの値から、どれだけオフセットしたかを示す値と定義している。入出力の輝度の範囲は、0.0~1.0で、出力の輝度がこの範囲を超える場合はクランプされる。傾きをもった直線部分は式(7)で計算する。

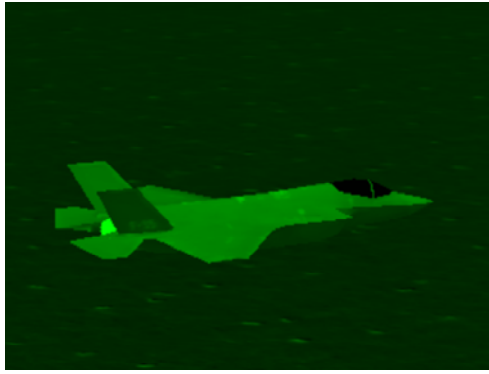
$$I_{out} = G I_{in} + 0.5 - G(0.5 - L) \quad (7)$$

G ゲイン

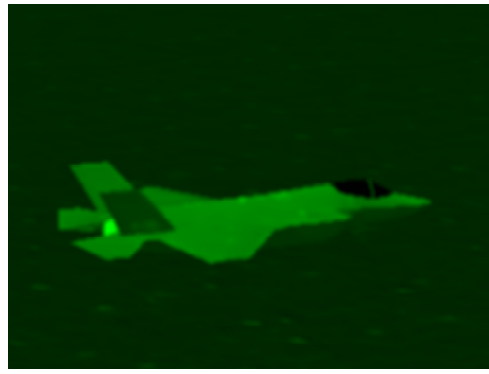
L レベル

I_{out} 出力する輝度値

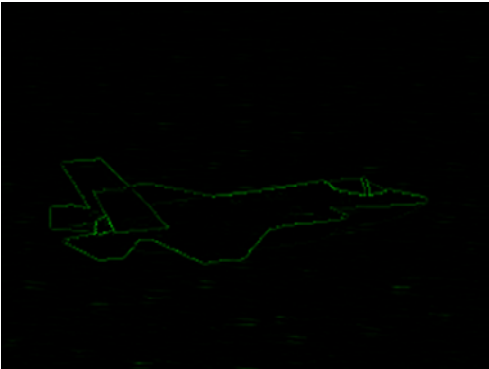
I_{in} 入力する輝度値



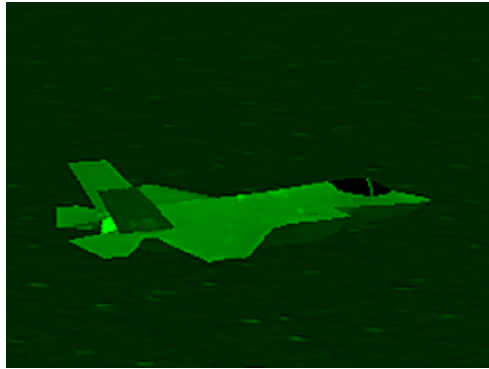
(a) 元画像



(b) スムーズ化



(c) エッジ抽出



(d) エッジ強調

図7 フィルタ処理のサンプル画像

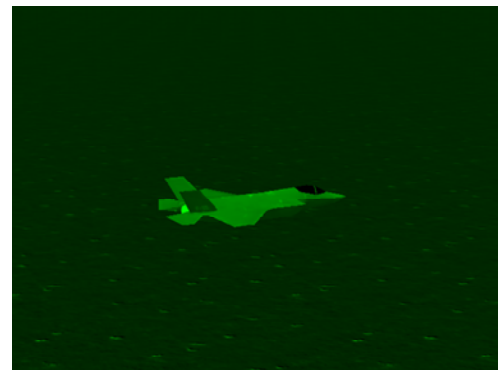
訓練用シミュレータではゲインとレベルの値を使用者が直接指示することもあれば、画像の輝度の平均値と分散からゲインとレベルの値を自動計算で求める場合（オートゲイン）もあるが、どちらにも対応可能である。図9にゲイン・レベルのサンプル画像を示す。図9の(a)は元の画像で、図9の(b)がゲインとレベルの演算を行った結果である。元の画像に比べゲインとレベルの演算を行った結果は全体的に明るく、地面の様も見やすくなっている。

5.3 モーション・ブラー

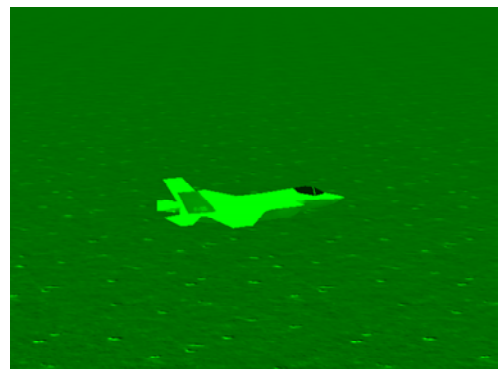
移動している物体がブレたようにみえる現象をモーション・ブラーという。モーション・ブラーは、1フレーム前の画像と、現フレームで作成した画像を使って、ピクセル毎に式(8)の計算を実施することで模擬している。図10にモーション・ブラーのサンプル画像を示す。図10は固定した視点から移動している飛行物体を観測している際の画像で飛行物体のみがブレ、背景の地形等はぶれていない。

$$I_{out} = (1 - f) \cdot I_n + f \cdot I_{n-1} \quad (8)$$

- I_{out} モーション・ブラー実施時のピクセルの輝度値
- I_n 現フレームにおける放射輝度画像の輝度値
- I_{n-1} 前フレームにおける放射輝度画像の輝度値
- f 混合率。運用中に変更可能な制御データである



(a) 元画像



(b) ゲイン 2, レベル 0.125 に設定した画像

図9 ゲイン・レベルのサンプル画像

移動する飛行物体がブレた画像となる

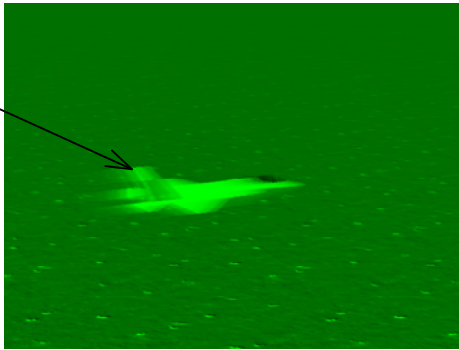


図 10 モーション・ブラーのサンプル画像

注:輝度の最大値は1.0, 最小値は0.0である.

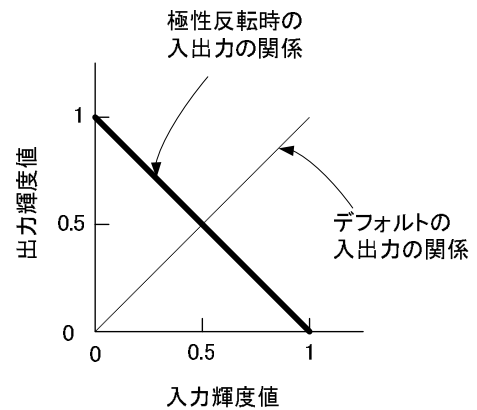


図 12 極性反転の入出力輝度の関係

5.4 電子的ズーム

モーション・ブラーの処理が終了した時点で、一度フレームバッファに出力し、それをテクスチャに変化して、その一部分を表示領域全体に拡大して入力することで電子的ズームの模擬を実現している。図 11 に電子的ズームのサンプル画像を示す。図 11 の (a) が元の画像で、図 11 の (b) が 4 倍の電子的ズームを行った画像である。

5.5 極性反転

極性反転は、画像の白と黒を反転させる処理である。図 12 に極性反転の入出力輝度の関係を示す。図 12 の極性反転時の入出力の関係を示す直線は式 (9) で与えられる。図 13 に極性反転のサンプル画像を示す。

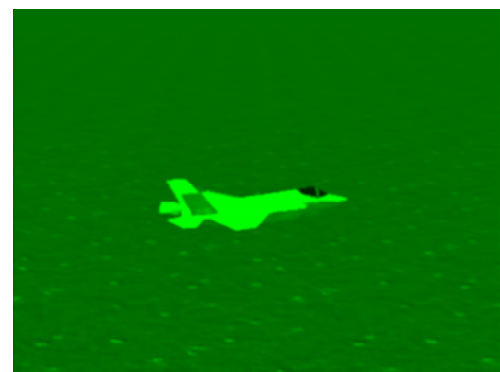
$$I_{out} = 1.0 - I_{in} \quad (9)$$

I_{out} 出力する輝度値

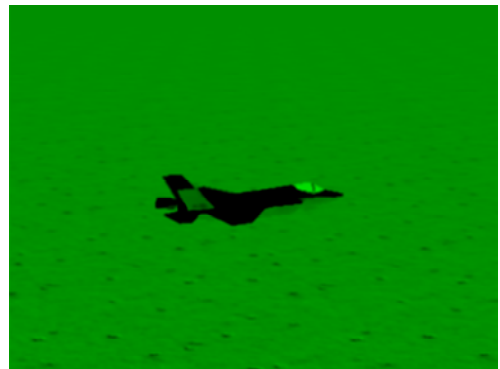
I_{in} 入力する輝度値

5.6 スナップショット

スナップショット取得命令を受け取った場合、ビデオ出力回路に出力するフレームバッファの命令された範囲(スナップショット画像)をテクスチャとして保存する。また、スナップショット表示命令を受け取った場合、命令された位置と大きさの範囲に、保存してあるスナップショット画像を表示する機能である。



(a) 元画像



(b) 極性反転した画像

図 13 極性反転のサンプル画像

フレームバッファの一部を切り出し表示領域全体に引き伸ばす

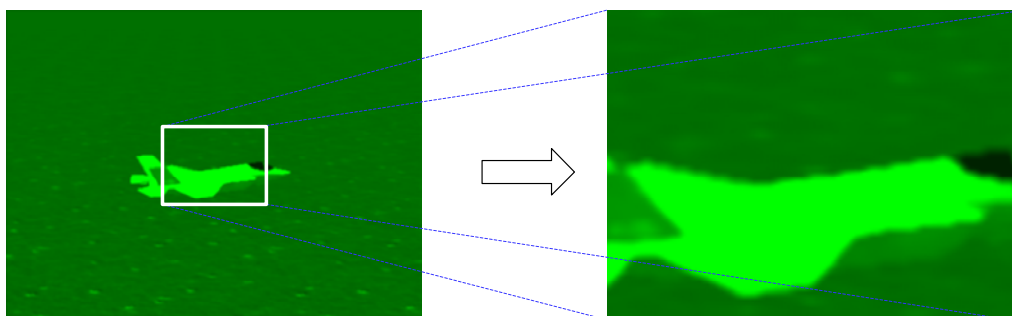


図 11 電子的ズームのサンプル画像：(a) 元画像，(b) 4 倍拡大画像

6 むすび

我々が開発した技術は特別な専用ハードウェアを使用せずに汎用的なハードウェアだけで IRIG の機能を実現した。IRIG の全処理を汎用的なハードウェアだけで実装することによって以下の利点が生まれる。

- 自社製品化したことにより、拡張性が高くバージョンアップなどの開発が効率的に行える。又、顧客の要求に応じて容易にカスタマイズできる。
- 汎用の PC を用いたことで、専用ハードウェアにかかる維持設計費・直材費・検査費用等が軽減され製品費が安価になる。
- ハードウェア・アーキテクチャが変更された際の互換性維持が容易である。本技術は、現在開発中の次世代の PC ベース映像発生装置にも移植中であり、今後、当社製の IRIG を適用する工事が広がっていくものと期待する。

参考文献

- [1] 久野治義, “赤外線光学,” 社団法人電子情報通信学会, p.53, 1994.
- [2] 久野治義, “赤外線光学,” 社団法人電子情報通信学会, p.71, 1994.
- [3] H. Delingette, “OpenGL Shading Language Second Edition,” Addison Wesley, pp.495-500, 2006.



大川 和彦 略歴

1987 年入社, 1987 年入社, 主にビジュアル関連のソフトウェア設計, システム設計に従事。



松本 律樹 略歴

2005 年入社, 主にビジュアル関連のソフトウェア設計に従事。



矢野 徹 略歴

1989 年入社, 主にビジュアル関連のソフトウェア設計, システム設計に従事。



本庄 広一 略歴

1979 年入社, シミュレータ及びビジュアル関連のソフトウェア設計システム設計に従事。

環境配慮設計型自動車教習所向け模擬運転装置の開発

超低価格，循環型・環境配慮設計の模擬運転装置

栗田 弦太

要旨： 全国の都道府県警で稼働していた講習用シミュレータ DS-200 が 300 台以上，リースアップとなり，廃棄される予定であった．この DS-200 の部品を有効に活用し低価格で環境にやさしい製品 DS-3000 を 2011 年 7 月より納入を開始した．DS-3000 は部品再利用により従来機種より大幅に値下げが可能となり，顧客の経営に貢献するだけでなく，循環型・環境配慮製品として産業廃棄物の削減 70%，新規資材投入の回避 83%，重量にして共に 43% 減を実現した．

1 まえがき

平成 22 年度の全国の自動車教習所卒業生数は約 160 万人で，22 年連続の減少となるとともに，260 万人強を記録した昭和 63 年に比較すると 60 % にまで減少した [1]．(図 1) 日本の出生数 [2] と比較すると，今後も更に減少し続け，2040 年頃には 120 万人程度まで減少することも危惧される．この状況に伴い，当社模擬運転装置の顧客である自動車教習所は統合・再編等を余儀なくされる厳しい経営状況の中にある．このような状況にある顧客に，少しでも設備投資の負担を軽減して頂こうと，大幅な価格低下が可能となる新製品の企画を行なった．

関係者で検討した結果，全国の都道府県警で稼働している警察向け講習用シミュレータ DS-200 が 300 台以上リースアップとなり廃棄される予定であった，この DS-200 の部品を正規に購入し直し再利用して，低価格な製品を製造するといういわばリファビッシュを行なう案を採用した．

このアイデアにより，大幅な価格低下で顧客に喜んで頂いただけでなく，循環型・環境配慮製品として地球環境にやさしい製品を実現したので報告する．

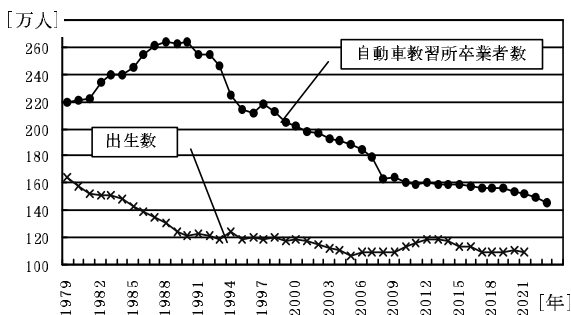


図 1 指定自動車教習所卒業生数と出生数の推移

2 DS-3000 の製品コンセプトおよびラインナップ

前機種である模擬運転装置 DS-2000 は 1999 年に開発し，2000 年より販売を続け 9 年経過した．CG によるインタラクティブで高度な教育を特徴としていたが，前項で説明した通り，顧客である自動車教習所の経営悪化に伴い，市場要求は高機能から低価格へとシフトしてきている．

昨今実施したニーズ調査では，高機能を要望する顧客は約 32.5 % に対し，機能を抑えてでも低価格を求める顧客は約 67.6 % となっておりニーズの二分化が顕著となっている．

そこで新規に開発する DS-3000 では，DS-200 のリファビッシュをしつつ，高機能版 (DS-3000Hybrid) と廉価版 (DS-3000Limited) の 2 ラインナップを市場に投入し，可能な限り顧客のニーズに応える製品コンセプトとした．



図 2 DS-3000 運転席外観

表 1 DS-3000 製品ラインナップ

ラインナップ	特 徴	
高機能版 DS-3000 Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> DS-2000 同様、CG によるインタラクティブな教育が可能 運転席個々に PC を搭載、高精細なリアルタイム CG を発生させる 高機能による高い教育効果を求める顧客がターゲット 	Ver. Up 可能
廉価版 DS-3000 Limited	<ul style="list-style-type: none"> 競合他社同様、映像一斉配信による教育 運転席には PC を搭載せず、中央モニター装置からの集中管理で倣い運転方式の教育を行う。 低価格優先の顧客がターゲット 	

DS-3000Hybrid は CG によるインタラクティブな教育が可能な高機能版であり、DS-3000Limited は映像一斉配信による倣い運転教育方式の廉価版である。(表 1 参照)

それぞれのラインナップ共、図 2 に示す運転席を最大 5 台中央モニター装置に接続可能である。

Hybrid のシステム構成を図 3 に、Limited のシステム構成を図 4 に示す。

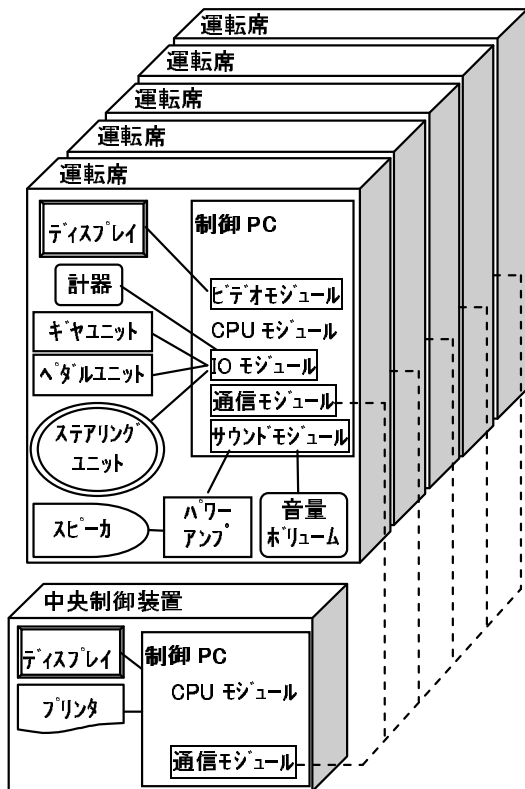


図 3 高機能版 DS-3000Hybrid : DS-2000 同様、ビデオモジュール (GB) を有する制御 PC を各運転席に搭載する。リアルタイム CG によりシミュレーション機能 (運転状況模擬) やアニメーション機能により、インタラクティブな教材を動作させる。

3 部品再利用への取り組み

DS-3000 では、部品再利用という初めての取り組みに際し、危惧される品質の課題をクリアするべく、図 5 のフローで開発を進めた。図 6 に部品再利用報告書の例 (一部)、図 7 に部品再利用チェックリストの例 (一部) を記す。

これらの経緯を経て、DS-200 の部品を使用し、必要な改造を加え DS-3000 (Hybrid/Limited) を製造した。DS-200 から DS-3000 への変更点概要を図 8 に示す。

4 部品再利用の成果

4.1 コスト低減成果

前項までの活動の結果、目標の一つであったコストの大幅な削減が実現できた。図 9 に前機種 DS-2000 の原価を 100 % とした比較グラフを記す。

部品再利用のチェックや組み直し等の手間が掛かり、工賃はさほど抑えられていないが、部品材料費は Hybrid 版で 59.6 % 減、Limited 版で 69.2 % 減と大幅に抑えることが出来た。これにより顧客にご提供できる価格も、平均で 30 % 以上販売価格低下が可能となり、2012 年 9 月現在の販売台数は 260 台を超え、受注が生産能力を上回る状況が続いている。

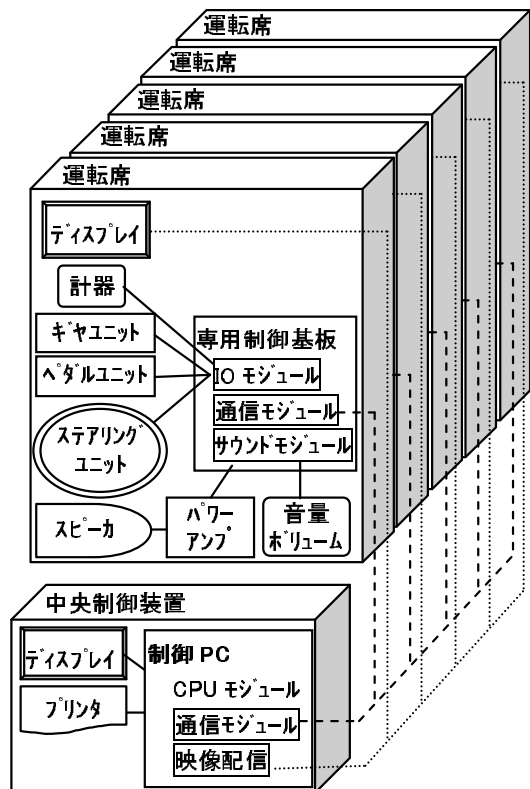


図 4 廉価版 DS-3000Limited : 高機能版と同じ筐体を使用するが、各運転席に制御 PC は搭載しない。その代わりに安価な専用制御基板を搭載し、映像一斉配信による倣い運転方式の教材を動作させる。

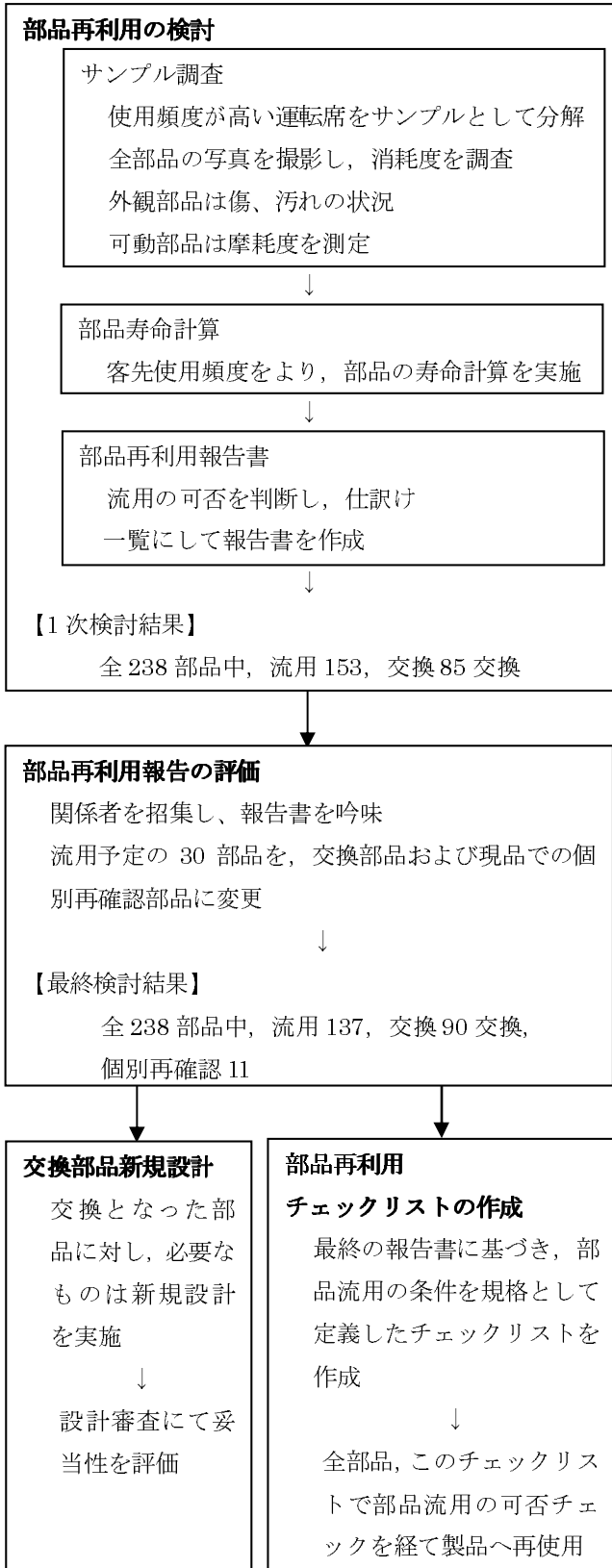


図 5 部品再利用への取り組みフロー

番号	部品名	現状写真	コメント
1	ベースフレーム		・両面テープやラバーシートの形跡が残っている。 →テープは完全に取外し、アルコールで拭き取り洗浄。 ラバーシート部も同様に洗浄で流用可能。 ・ブランク搭載板金にゆがみがある。 →液晶モニタ搭載時にアングルを追加し歪み補正を行う。 ・製造名版は張替え、PLシールは流用。 ・溶接箇所は問題なし。
2	シート取付金具 (前部)		・細かな傷(汚れ)はある ・丸穴(ネジ止め部分)に塗装はがれがある。 ・形状変形なし。 →変形がなければ流用。
3	シート取付金具 (後部右)		・細かな傷(汚れ)はある。 ・丸穴(ネジ止め部分)に塗装はがれがある。 ・ネジ穴は損傷なし。 ・形状変形なし。 →変形がなければ流用。
4	シート取付金具 (後部左)		・細かな傷(汚れ)はある。 ・丸穴(ネジ止め部分)に塗装はがれがある。 ・ネジ穴は損傷なし。 ・形状変形なし。 →変形がなければ流用。
5	アンパベース		・細かな傷(汚れ)はある。 ・丸穴(ネジ止め部分)に塗装はがれがある。 ・ネジ穴は損傷なし。 ・形状変形なし。 →変形がなければ流用。
6	スイッチモジュール		・各ボタンに汚れはあるものの大きな損傷なし。 ・ボタンの配線は半田付けされている。 ・矢印と○のモーター動作やロカスインチ動作良好。 →事前に電氣的動作確認を実施し、機能に問題なければ流用。

図 6 部品再利用報告書の例

DS-3000 リファビッシュ用選定チェックシート

DS-200 製造番号	判定	実施日	MPC
	<input type="checkbox"/> 合格	20	
	<input type="checkbox"/> 不合格:部品取り筐体	/	

部位	検査内容	判定	部位	検査内容	判定
1	筐体大きな傷が無い事	20	ステアリング(輪)	変形していない	
2	キャスターが回転して移動できる	21	回転させたとき異様に重くない		
3	レヘルアジャスタに大きな変形がない	22	ホンカパーに大きな傷、汚れが無い		
4	背面版に大きな傷、変形が無い	23	ウインカレバーが戻る		
5	運転席座席	24	ステアリング	ホンカパーを外しホンスイッチ接触部(ゴム側金属サークル)に変形がない	
6	操作キーに大きな傷が無い	25		外観に大きな傷、汚れがない	
7	タッチボードに大きな傷、汚れが無い	26		成形品の勘合に大きな隙間がない	
8	アンダーベースに大きな傷が無い	27		エンジン・キーが操作できる	
9	アンダーベースのクランチシールの有無	28		スベア・エンジン・キーがあり操作できる	
10	フロアマットに大きな傷、汚れが無い	29		アクセルパッドに大きな傷、割れがない	
11	シートに大きな傷、汚れが無い注1	30	ABC(アジャスター・ブレーキ・クランチ)	クランチパッドに大きな傷、割れがない	
12	シートスライドで前後移動、固定できる	31		操作に支障のある重さでない	
13	リクライニングにガタキが無い	32		ペダルアームにがたつきがないこと	
14	ヘッドレストカパーに傷が無い	33	ギアノブ	取り外せる。内部が空回りしない	---
15	シート	34	---	---	---
16	ヘッドレストアームの平ネジがある	35	---	---	---
17	ヘッドレストの配線がある	36	---	---	---
18	シートベルトが引き込む	37	---	---	---
19	シートベルトに切れがない注2	38	---	---	---
	シートベルトのバックル・スナップがある	38	検査印	名板付近にテープにて良否を示す	

全体注意1:大きな傷とは、タッチポイントで修復不可能及び凹みである。
 全体注意2:汚れとは清掃しても落とす事のできない物。1m離れた位置から目視して確認できなければ良とする。
 全体注意3:リファビッシュ品の付け替えで使用可能となる項目については連絡事項に記述。
 注1:シート座面、横の成形品含む。
 注2:シートベルトの端のほつれは、ほつれ処置を連絡事項に記述するか、処置した結果を記述。
 連絡事項(番号記入してわかりやすく)

図 7 部品再利用チェックリストの例



番号	変更部分	DS-200	DS-3000
①	モニター	28型TV	32型LCD
②	PC	産業用PC	民生PC
③	側板	木工(全面)	木工(下部)
④	天板	TVの上部を覆う	なし
⑤	背面カバー	TVの背面全体を隠す	LCD配線のみ隠す
⑥	ギヤユニット *注	簡易式 AT/MT切替	フルレンジ AT/MT切替

*注: ギヤユニットはDS-200/3000に求められている機能の違いにより、変更が必要であったもの。

図8 DS-200 3000 変更点概要

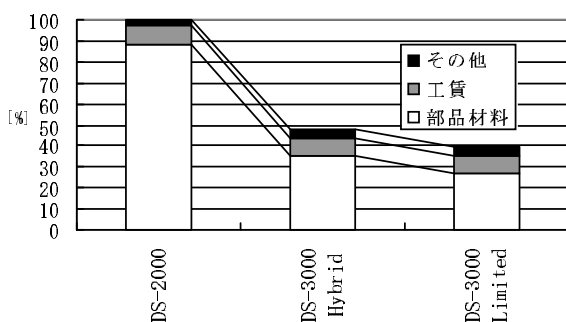


図9 DS-2000 コスト低減成果

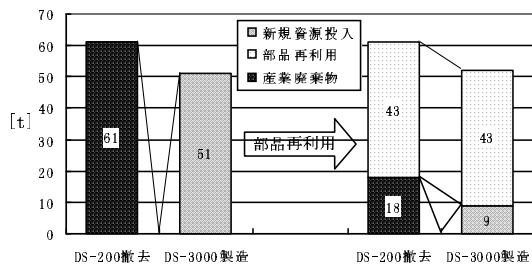


図10 DS-3000 新規資材低減成果

4.2 環境配慮

二つ目の目標であった環境への配慮に関しては、多くの部品を再利用することにより、資源有効利用という側面で大きな成果が得られた。図10に示した通り、本来ならばリース期間が満了し、廃棄されるはずだったDS-200、約260台分、重さにして61tの内70%にあたる43tの部品を再利用した。また新製品としてDS-3000を製造する際、本来なら必要であった51tに及ぶ資材の内、上記部品を利用することにより新規資材の83%にあたる43tの投入を回避できた。

これ以外にも、

「廃棄物処理工程におけるエネルギー使用の回避」

「新規部品生産工程におけるエネルギー使用の回避」

「新規手配品・廃棄処理品の輸送縮小による運搬時エネルギー使用の抑制」

等、温室効果ガス発生抑制にも貢献できた結果となった。

5 むすび

2011年7月より、全国の自動車教習所へ販売を開始したDS-3000だが、予想を上回る売れ行きで、部品の再利用を見込んでいた警察向け講習用シミュレータDS-200のストックがほぼ0となってしまい、2012年度内での生産終了が決定した。

偶然の恵まれた環境から、計画以上の売上を記録し顧客に対しては、高機能の設備を低価格で提供でき、地球環境にやさしい循環型製品が実現出来た。今後も機会があれば、同様の製品の実現を目指したいと考える。

参考文献

- [1] 警察庁ホームページ，“運転免許統計(平成23年度版),”
http://www.npa.go.jp/toukei/menkyo/menkyo13/h23_sub2.pdf/ .
- [2] 統計局ホームページ，“日本の統計-第2章人口・世帯,”
<http://www.stat.go.jp/data/nihon/02.htm/> .

[執筆者紹介]



栗田 弦太 略歴

1990年入社、自動車シミュレータの機構設計に従事。

ボーン・スキニング方式適用人物モデルを用いた 鉄道シミュレータ向け人物動作表現技術

練尾 正美, 竹田 和司, 川上 隆行, 鳥井 淳弘, 石崎 八月

要旨： 鉄道シミュレータで模擬されるプラットフォーム上の人物について、これまでの鉄道シミュレータに比べ、人物の動作表現を向上させることを目的に開発を実施した。本開発では、人物モデルとモーションデータ（歩行、走行などの動作データ）を分離するとともに人物モデルにはボーン・スキニング方式を採用し、多様な動作を自然に表現することを可能にした。また、人物の行動を簡易に設定可能なオフラインツールを開発し、複雑な行動や多人数の設定が可能なシステムを実現した。この成果は東日本旅客鉄道株式会社殿向け E2 系新幹線シミュレータにて適用され、さらに幅広く展開を進めている。

1 まえがき

弊社の鉄道シミュレータは、利用目的により教育訓練用、研究開発用及び展示用に分類され、このうち教育訓練用の鉄道シミュレータは、各鉄道事業者の研修センター、養成所等において、新規乗務員の養成や乗務員のフォローアップ訓練で通常の運転取扱操作や異常時対応訓練に活用されている。[1, 2]

一方、鉄道運転事故等の発生状況について、例えば東日本旅客鉄道株式会社での鉄道運転事故発生件数は、1990 年度 240 件から 2010 年度 144 件と減少しているが、鉄道人身障害事故については、発生件数が 1990 年度の 115 件から 2010 年度の 106 件とほぼ横ばいである。また、鉄道人身障害事故 106 件のうち、プラットフォーム上における列車への接触や、プラットフォームから転落して列車と衝突した事故が 77 件 (73%) 発生しており、このうち酔客が約 7 割を占めている。[3]

これまでの鉄道シミュレータにおいてもプラットフォームでの転倒、線路への転落、戸挟み等の鉄道人身障害事故に対応した訓練シナリオを有しているが、移動や振る舞いの人物動作が単調で現実に対し違和感がある、あるいは多人数の表示や制御が困難である等の課題があった。

そのため、鉄道シミュレータを利用した訓練をより効果的なものにするためには、プラットフォーム上の人物動作表現の機能・性能を向上させ、鉄道人身障害事故対応の訓練シナリオをより充実させることが重要なポイントの一つであると考え、人物動作表現の向上を目的とした技術開発に取り組み、製品へ適用した。

2 人物動作表現技術の開発項目

鉄道シミュレータの模擬視界映像は、コンピュータグラフィックスの高性能化やデータベース作成技術の向上、並びに、データベース作成ツールの充実により、駅、線路、保安設備、景観、自然環境等について向上が図られてきている。[4]

また、人物の映像表現の向上は進められてきたが、人物の動作表現については、前述のような課題があるとともに、訓練者に対し転倒等の異常の発生を予見させないため、同じ場面でも異常の発生の有無やタイミングに多様性を持たせた制御や、列車の停止位置や車掌のドア開閉のタイミング等、訓練状況により条件が変化することに対しても自然に振る舞える制御が必要であった。

表 1 人物動作表現技術の開発項目

番号	項目	内容
1	自然な動作	人物モデルとモーションデータを分離し、人物モデルについてはボーン・スキニング方式を用いることで自然で多様な動作を可能にする 停止状態から歩行状態のように動作が変化する場合、動作間のデータを補間処理しながら遷移させる
2	多人数の表現	処理の高速化及びツールによる多人数の設定、並びに、人物の自動行動により多人数の表示と制御を行い、プラットフォームでの混雑した状況を表現できる
3	人物の移動経路	直線及び曲線的な移動経路をツールで簡単に設定でき、人物が経路に沿って自動的に段差や階段の昇降ができる
4	シナリオ確認	シナリオ設定結果をツール上に表示し確認できる

以上のような点を踏まえ、鉄道シミュレータ向け人物動作表現技術に関し表 1 に示す各項目について開発を実施した。3 章以降、開発した技術内容を次の分類により報告する。

- ① 人物モデルデータ
- ② データ作成ツール
- ③ 製品への組み込み

3 人物動作表現技術

3.1 人物モデルデータ

これまで人物の動作表現は、時系列に沿った動作パターンの人物モデルを予め用意しておき、必要なタイミングで動作パターンを順番に再生し、動作するように見えるアニメーション方式を採用していた。このアニメーション方式では、動作ごとに動作パターンの人物モデルが必要であるため、動作の種類を増やすことや、条件により動作に変化をつけることには制約があった。

そのため新たな方式として、人物モデルとモーションデータ（歩行、走行などの動作データ）を分離し、人物モデルについては、ボーン・スキニング方式を用いて作成した。ボーン・スキニング方式では、スキン（皮膚）とボーン（骨格）データを基にして人間の形状を 1 つのスキニングデータ（ポリゴンモデル）として作成し、ボーンデータの変形に応じてスキニングデータの頂点を移動させ表示する方式である。図 1 にボーン・スキニング方式による人物モデルの一例を示す。図 1 ではボーンデータとスキニングデータを組み合わせた人物モデルの初期状態に対し、歩行状態のモーションデータに従いボーンデータを変形させ、ボーンデータの関節に合わせてスキニングデータの頂点を移動し変形させることでスキニング後の人物モデルのような歩行状態の人物モデルが作成されることを示している。

この処理を繰り返すことにより図 2 に示すような人物が歩行している状態を表現することができる。従って、様々なモーションデータと人物モデルの組み合わせにより、多様な動作表現が可能となる。

さらに、モーションデータには、モーション編集ソフトウェアを用いて作成及び編集する以外に実際の人物の動きをデータに取り込んだモーションキャプチャデータを利用可能としたため、モーション編集ソフトウェアでは作成が困難な複雑な動作を表現することができるようになった。

スキニングデータの変形を自然に見せるため、スキニングデータの頂点 1 つにつきボーンデータの最大 4 関節を関連させ、関節の位置及び回転の影響を頂点の位置へ加味し移動する



図 1 スキンデータとボーンデータによる人物モデル



図 2 人物モデルの歩行動作イメージ

ことができる。

スキニングデータの頂点 P の移動後の頂点位置 P' は、関連付けられた関節との関係により

$$P' = \{(Porigin - Jorigin[0]) * (Q[0] * Qp[0]) + J[0]\} + W[0] \\ + \{(Porigin - Jorigin[1]) * (Q[1] * Qp[1]) + J[1]\} + W[1] \\ + \{(Porigin - Jorigin[2]) * (Q[2] * Qp[2]) + J[2]\} + W[2] \\ + \{(Porigin - Jorigin[3]) * (Q[3] * Qp[3]) + J[3]\} + W[3]$$

ここで、

$$W[0] + W[1] + W[2] + W[3] = 0$$

$Porigin$ は頂点初期位置、 $Jorigin$ は関節初期位置、 J は関節位置、 Q は関節 J の回転量、 Qp は関節 J の親関節の回転量、 W は頂点 P に対する関節 J の重みである。図 3 にスキニングデータの頂点とボーンデータの関節との関連付けについての例を示す。

ボーン・スキニング方式では、全てのスキニングデータの頂点に対し移動を行い、スキニングデータを変形させるため、これまでの人物モデルと比較し計算量が増大する。さらに多人数を表示するためには、計算処理の高速化が必要であった。そこで、表示する人物を人数によりグループに分け、グループごとにマルチスレッド化を利用した並列化処理を実施するとともに、スキニングデータの変形処理にはグラフィックカード上のプロセッサ（ベクトル演算器）を利用することで処理の高速化を実現し、その結果リアルタイムで多人数の表示が可能となった。

図 4 は、開発した人物モデルの一例を示す。これらの人物モデルはいずれもボーン・スキニング方式で作成されて

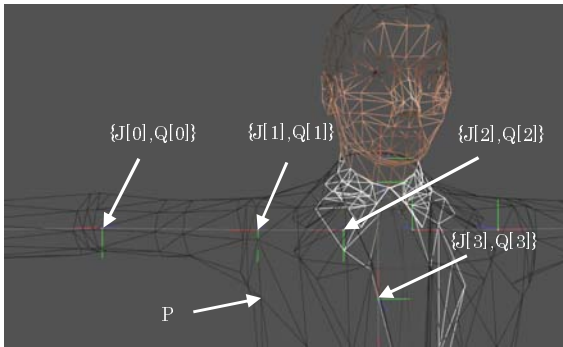


図3 スキンデータの頂点とボーンデータの関節の関連付けの例

おり、様々な動作表現が可能である。

3.2 データ作成ツール

人物モデルデータの作成から、シナリオデータの作成までのオフラインのデータ作成作業を効率化するため、ソフトウェアツールであるモデルデータベースビルダ及び人物シナリオ設定ツールを開発した。

ツールを使用したデータ作成フローを図5に示す。モデルデータベースビルダ及び人物シナリオ設定ツールともGUIにより視覚で確認をしながら作業が可能であり、双方のデータの授受はモデルデータベースを介して行う構造



図4 人物モデル例

である。

(1) モデルデータベースビルダ

モデルデータベースビルダは、複数の人物モデルとそれに対する複数の動作、状態遷移、移動速度のモーションデータを一元管理するデータベースであるモデルデータベースを編集及び管理するツールであり、ボーン・スキニング方式の人物モデルに対しGUIによって各モーションデータに関する情報の付加及び編集、並びに、複数の人物モデルを読み込みと一括管理を行い他のソフトウェアで簡易に扱えるようにする。モデルデータベースビルダの主要機能を表2に示す。

(2) 人物シナリオ設定ツール

人物シナリオ設定ツールは、シミュレータで発生させるイベントのうち人物動作に関連する制御を人物シナリオとしてシミュレーションプログラムと独立させ、オフラインで設定・制御するツールである。人物設定シナリオツールでは、運用時の映像発生装置と同様の映像によるプレビューを行いながら、マウス操作によってシナリオ編集作業を行うことが可能である。また、プレビューで設定したシナリオをそのままシミュレータのオンラインで使用可能であるため、極めて効率的なシナリオ設定ができるようになっている。表3に開発した人物シナリオ設定ツールの制御項目について既存方式との比較を示す。ここで既存方式の直接入力、または、直接指定とは、プログラム等で直接数値を定めることを意味する。図6は、人物シナリオ設置ツールによる移動経路の設定の操作画面例である。

表2 モデルデータベースビルダの主要機能

番号	項目	機能
1	属性の付加	モーションデータに対し、以下の属性を付加する。 <ul style="list-style-type: none"> ・動作遷移 ・繰り返し再生回数 ・平均移動速度 ・状態設定
2	データ管理	人物モデルデータのボーンデータ及びスキンデータ、並びに、モーションデータをデータベースとして一元管理する。

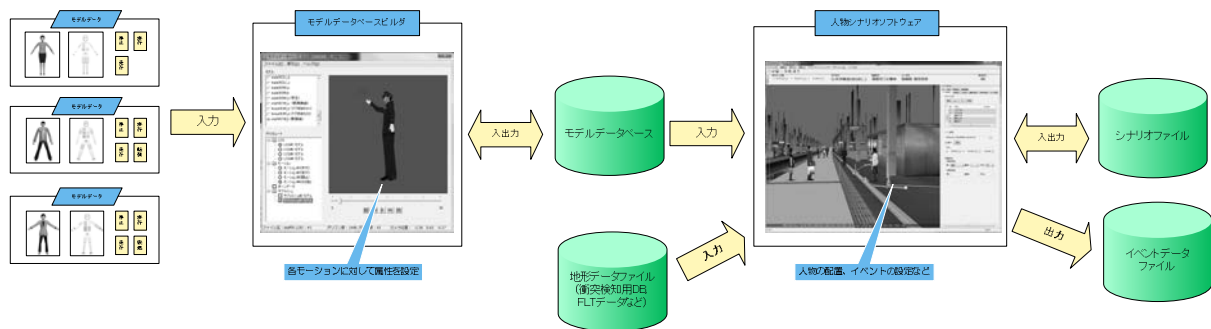


図5 データ作成フロー

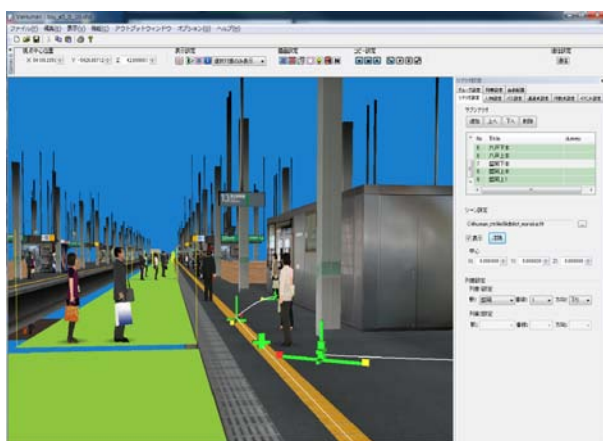


図6 人物シナリオ設定ツールの操作画面例

シミュレーション・ホスト計算機及び映像発生装置に人物動作表現に必要な機能を組み込むことで実現した。

人物動作表現に必要な各種機能は、次のような機能ごとに分類したライブラリを構築し、組み込み作業を容易にした。

- ① 動作補間ライブラリ
- ② 人物表示ライブラリ
- ③ 列車情報通知ライブラリ
- ④ 行動制御ライブラリ
- ⑤ 人物シナリオ制御ライブラリ
- ⑥ 人物シナリオ情報制御ライブラリ

各ライブラリの機能について表4にまとめる。また、図7に代表的なシステム構成図、図8にオンラインでの表示例を示す。

4 製品への組み込み

4.1 システム構成

鉄道シミュレータへの組み込みは、既存のシミュレーションシステムに対し、人物制御計算機を追加するとともに、

表3 シナリオ設定方式

番号	シナリオ制御項目	既存方式	開発方式
1	人物の配置	直接入力	プレビュー上でマウス操作にて配置
2	人物の移動	移動速度を直接入力	指定されたパス上を移動
3	人物の移動経路	複数の直線移動を連続して指定、直接入力	マウスにて指定、または始点・終点を指定後経路探索にて取得
4	人物の動作	制御番号から直接指定	モデルデータベースから読み込んだ行動リストの中から選択、速度情報も加味
5	人物の動作切り替え	条件分岐で即時切り替え	モデルデータベースから読み込んだ状態遷移に従い、動作補間を行いながら切り替え
6	イベント設定	条件を直接指定	ツール上でイベントを定義し、イベントの影響範囲、個別の反応などを設定可能
7	人物のドア挟まれ検知	複数人数一体で検知	個別の人物が検知

表4 人物動作ライブラリ

番号	ライブラリ名	機能
1	動作補間ライブラリ	異なる2つのモーションデータを補間しボーンデータの変形処理を行う
2	人物表示ライブラリ	変形したボーンデータを基に、スキニングにより人物形状を算出する 多人数のリアルタイム表示のため、並列処理を行う
3	列車情報通知ライブラリ	各車両の位置、ドア開閉情報等を取得する
4	行動制御ライブラリ	任意の開始地点と終了地点の指定により、移動経路を自動的に算出する
5	人物シナリオ制御ライブラリ	人物モデル、動作、経路、イベントを設定し、シナリオファイルを作成する 人物シナリオの動作を制御する
6	人物シナリオ情報制御ライブラリ	列車に関連するイベント情報(列車の停車、発車、警笛等)を取得する

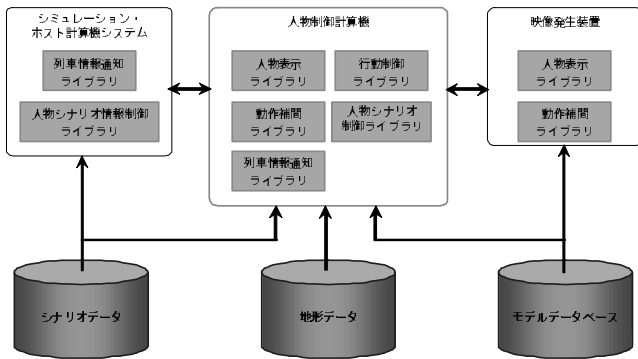


図 7 システム構成図



図 9 E5 系新幹線シミュレータ概観図



図 8 オンラインでの表示例

4.2 製品への適用例

(1)E2 系新幹線シミュレータ

2010 年 3 月に納入した東日本旅客鉄道株式会社殿向け E2 系新幹線シミュレータの改修工事では、計算機システム及び映像発生装置の老朽換装に合わせ、新しく開発した人物動作表現技術を取り入れた。この技術により、プラットフォーム上の乗客や駅員の行動や振る舞いをより自然とすることができた。さらに、車掌シナリオのうち、乗客に関連するイベントである乗客の戸挟み及び乗客駆け込みなどをより自然に実現することができた。

(2)E5 系新幹線シミュレータ

図 9 に概観図を示す 2012 年 3 月に納入した東日本旅客鉄道株式会社殿向け E5 系新幹線シミュレータでは、プラットフォーム上の乗客の人物モデル及びモーションデータ、並びに、移動経路を一部更新するとともに、モーションデータの一部にモーションキャプチャを取り入れることで、より一層自然な動作を実現した。また、運転士の運転操作にあわせ人物の動作が変わる旅客接近のイベントを実現した。

5 むすび

開発した人物動作表現技術により、鉄道シミュレータにおける人物動作表現の向上が図られ、プラットフォーム上の

駅員や乗客の動作がこれまでに比べ自然になり、複雑な行動をしたイベントも実現することができた。さらにオフラインのツールにより、データ作成やシナリオ設定作業の効率化を実現することができ、結果としてお客様のご要求にこれまで以上に応えることが可能となった。

今後は、登場人物が多く、条件の複雑なシナリオへの適用や、ラッシュアワー等を再現することにより、鉄道シミュレータを利用した訓練が、より実態に即し、効果的なものになるものと期待される。

さらに、鉄道シミュレータに限らず、自動車等のシミュレータも含め、教育訓練及び研究開発のいずれの用途においても人物動作表現は重要な技術であり、シミュレータの価値を高めるためにも引き続き向上を目指していきたい。

参考文献

- [1] 大本博次, “シミュレーション・画像技術の展望,” 三菱プレジジョン技報, vol.2, pp.16-21, 2006.
- [2] 岩崎佳彦, 古川高英, “車掌訓練装置(新幹線/在来線)の導入,” ROLLING STOCK & MACHINERY, 2006 第 1 号, pp.60-63, 2006.
- [3] 東日本旅客鉄道株式会社, “安全報告書 2011,” 2011.
- [4] 宮崎正剛, 若林知行, 矢野徹, 川上隆行, “PCIG DiaScene IG-95/80 の開発,” 三菱プレジジョン技報, vol.2, pp.44-50, 2006.

[執筆者紹介]



練尾 正美 略歴

1984年入社，各種シミュレータのシステム設計及びソフトウェア設計に従事．



竹田 和司 略歴

2000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．



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．



鳥井 淳弘 略歴

2007年入社，主に鉄道シミュレータのシステム設計に従事．



石崎 八月 略歴

2007年入社，主に画像システム及び各種シミュレータのソフトウェア設計に従事．

術前計画型手術シミュレータの開発およびその臨床評価

長坂 学, 高波 健太郎, 坂本 英男, 乾谷 徹, 本郷 新, 菊川 孝明, 寺田 尚史, 緒方 正人

要旨：我々は、患者個別に対応する術前計画型手術シミュレータを開発した。このシステムは、すでに商用化されている内視鏡下手術シミュレータとは異なり、診断用の CT 断層画像から患者の生体モデルデータを生成し、これに基づいた術前シミュレーションができる世界初のシミュレータである。従来のバネモデルに基づく変形計算の数値的不安定性を解消するために有限要素モデルを用いたことにより達成した。本システムにより、患者固有の血管本数、走行状態を再現した術前シミュレーションが可能となり、内視鏡下手術の安全性向上、および手術時間短縮への寄与が期待できる。横浜市立大学附属病院泌尿器科で臨床評価試験を行った結果、実手術のイメージングに有効との評価を得た。

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。表 1 は、横浜市立大学附属病院 泌尿器科手術件数の推移である。表 1 に示すように、腹腔鏡下手術は増加傾向にある。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基づき、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、患者固有の症例に基づいた術前計画、および術前リハーサルが可能な術前計画型手術シミュレータが期待されている。

我々は平成 16 年から独立行政法人 情報通信研究機構殿の委託研究として、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、基礎研究を実施した [5, 6, 7]。この手術シミュレータを構成する主要技術には (1) 生体モデルデータ生成技術 (2) 実時間力学計算技術 [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11], (3) ヒューマンインタフェース技術 [7, 12] 等がある。

現在、これらを総合したプロトタイプシステムを横浜市

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
腹腔鏡下手術件数	33	43	40	57	96	269
腹腔鏡下手術割合	35 %	42 %	42 %	63 %	77 %	53 %

立大学附属病院泌尿器科に試験導入し、臨床試験を行っている。本試験の目的は、さまざまな症例の患者データに対し、術前計画に有効なシミュレーションが可能か、本システムの実用性を検証することにある。本論では、本システムの主要構成技術および、臨床試験の結果について報告する。2 章では、現在市販されている手術シミュレータについて、3 章では、システムの構成技術について、4 章では、試験内容について、5 章では、その結果について、6 章では、まとめを記す。

2 従来システム

現在、市販されている手術シミュレータ [13, 14, 15] は、初期の頃が開発され既に技術が確立しているばねモデルを用いて開発されたタスクトレーナ^{*2}である。生体モデルデータを自由に作ることができ、患者固有のモデルデータで訓練できる術前計画型シミュレータは未だ実用化されていない。この理由は、ばねモデルに基づく変形シミュレーションは計算量が少なく実時間化には有利であるが、動作の安定性に関する課題があり、CT データから自由に生体モデルデータを作成することが難しいことにある。

これは、作成したばねモデルのばね定数 K が、次の臨界値、

$$K_c = \frac{\sum_i m_i}{n\pi^2(\Delta t)^2} \quad (1)$$

より大きいと変形計算が破綻するからである [16, 17]。ここに m_i は各ばねが代表する質量であり、 n は質点数、 Δt

^{*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。

^{*2} 対象手術の手順および手術部位と術具の相互関係を訓練するための訓練装置

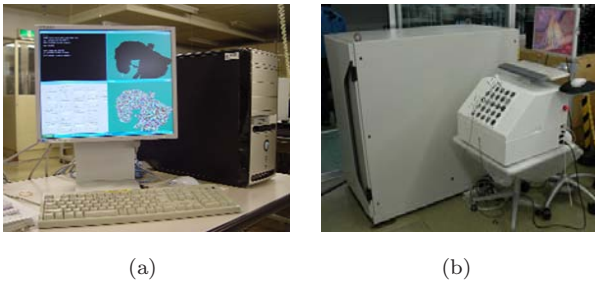


図1 開発した手術シミュレータの概観 (a) 生体モデルデータ生成装置概観, (b) 手術シミュレータ本体概観

は計算刻み時間である．計算量との関係から，この計算刻み時間は小さくできないので，変形シミュレーションを高速かつ安定的に計算するには，ばね定数を小さくするか，質点の総数を減らす必要があり，複雑な構造の生体モデルの表現が形状および力学的に粗くなる．このため，想定した物性値を用いて3次元的なばね定数を自動的に決めることができず，開発技術者の経験的なチューニングが必要である．

しかし，術前計画型シミュレータの実現には，医師やレントゲン技師等の非専門家が，短時間で，自由に生体モデルデータを作ることが必要である．

3 開発システム

図1に，開発した手術シミュレータの概観を示す．装置は大きく分けて，生体モデルデータ生成装置と手術シミュレータ本体からなる．模擬術具はトロカール位置決め用多穴板，左右の模擬鉗子とこれに付属して力を返す2台の力覚装置，模擬スコープおよびモニタ画面からなる[18]．また，力覚装置は3自由度の3軸パラレルリンク方式であり自社開発したものである[12]．図1(a)は生体モデルデータ生成装置の概観を，図1(b)は手術シミュレータ本体の概観を示す．

生体モデルデータ生成装置で，CTデータを取り込み，シミュレーション用の有限要素モデルを生成する．手術シミュレータ本体で，構築した有限要素モデルを用いて，手術シミュレーションを行う．

開発した手術シミュレータの要素技術は(1)生体モデルデータ生成技術(2)実時間力学計算技術[5, 6, 7, 8, 9, 10, 11]，(3)ヒューマンインタフェース技術[7, 12]から構成される．以下，開発した基盤技術を述べる．

3.1 生体モデルデータ生成

事前に準備された標準的なモデルでなく，診断CTデータやMRIデータから直接患者固有のモデルを作成できる．図2(a)に生体モデルデータの作成の流れを示す．処理手順は，以下の7つである．

- (1) データ変換 CTデータ(DICOMフォーマット)を2次元画像データ群へ変換する．変換には，腎臓周りの血管が判別しやすいような設定，すなわち， $-90 \sim 190\text{HU}$ ^{*3}のCT値を有効として8bitの断層画像データ群を生成する．
- (2) セグメンテーション 指定する臓器を抽出する処理．図2(b)のように断層画像の数枚に対し，抽出する臓器の代表点(教師点)を指示し，それを元に画像処理を行い，臓器を抽出する．画像処理は，共同研究先である理研殿の拡張リージョングローイング法[19]や，スプライン補間，輪郭抽出等の一般的な画像処理技術の組み合わせで行い，画像処理では自動的に修正できない細部については，手動で行う．
- (3) メッシュデータ生成 詳細度を考慮して表面に三角形パッチを生成後，臓器同士のつながりを拘束条件として四面体有限要素分割を行う[20, 21]．
- (4) 挙上シミュレーション 手術中は，腎臓を大きく移動させ，ワークスペースを確保する．そのための腎臓の移動を挙上と言う．この大変形については，オフラインシミュレーションを行う．
- (5) 周辺組織生成 CT画像データから判別が困難な臓器周辺組織(リンパ管/脂肪等の結合組織，腹膜)の模擬形状データを付加する[22]．
- (6) テクスチャ付与 生体モデルデータの表面に視覚的質感を向上させるために，模様のテクスチャを貼る．模様は，CTデータから得られないため，一般的な腎臓の模様を使用している．
- (7) 物性値付与 生体の物性値の特定は重要な課題であり未だ正確にわかっておらず，世界的に研究が進行中である．このため，個別の論文による一部計測された臓器の物性値[23]を基準として，外科医の操作感覚による評価を元に補正し，臓器識別番号をインデックスとしてテーブル化した．表2は，本システムで用いた臓器と物性値の対応表である．ポアソン比は，臓器種類にかかわらず0.46，ヤング率は0.5~2.0kPaの範囲で設定している．

短時間に生体モデルデータを生成することは，医師の負荷を軽減するために重要である．そこで，上述(2)のセグメンテーション機能については，作業時間短縮に向け次に示す段階的な機能拡充を実施しようとしている．

phase1:拡張型リージョングローイング法[19]による自動抽出(前述システム)

^{*3} HUは，水を0，空気を-1000とする単位で，X線吸収係数に比例した数

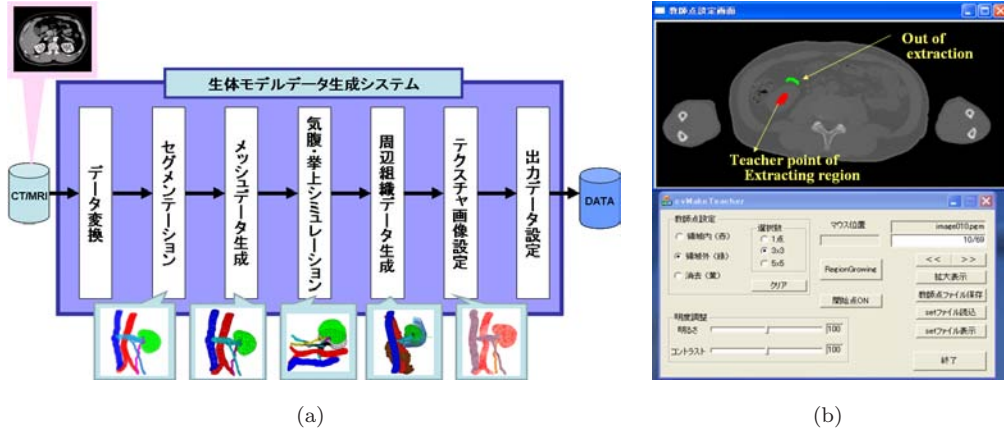


図2 生体モデルデータの処理 (a) 生体モデルデータの作成の流れ (b) 教師点入力の GUI 画面

表2 臓器と物性値の対応

臓器名	ヤング率	ポアソン比
腎臓	2.0KPa	0.46
大動脈	0.9KPa	0.46
腎動脈	0.9KPa	0.46
大静脈	1.0Kpa	0.46
尿管	0.9KPa	0.46
静脈	1.0KPa	0.46
リンパ組織	0.5Kpa	-

phase2:グラフカットによる自動抽出 + ユーザインターフェース (UI) に特化した抽出機能 (理研の V-Tracer[24, 25]) の追加

phase2 の機能については、後述の臨床試験にて有効性を確認した後、システムに実装する。

3.2 実時間力学計算

手術シミュレータでは大変形を伴うため、処理時間と変形のリアリティとの兼ね合いから、線形弾性体モデルを基本とした擬似非線形処理を用いた。生体の模擬では、空間的に計算中心が分布する連続体として運動を取り扱う必要がある。数学的には偏微分方程式で規定された式 (2) の境界値問題を実時間で解くことが必要となる。この境界値は臓器が膜や筋を通して骨等に固定される構造や、術具による外力から決まる。

$$\nabla T + \rho \left(g - \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} \right) + \nu \frac{d\mathbf{u}}{dt} = \mathbf{0} \quad (2)$$

このとき、 T はコーシ応力テンソル、 ρ は密度、 g は単位体積当たりの体積力ベクトル、 \mathbf{u} は変位ベクトル、 ν は粘性係数を示す。

式 (2) は、平衡状態にある臓器に術具等で操作を施すことにより、第 1 項に新たな平衡状態の物体内部の力が、2 項にその動きに起因する慣性力が、3 項に粘性による抵抗力が発生し、それらが平衡していることを示す。

式 (2) を精度を保証して数値的に解くため、式 (3) の有限要素式に変換する。このとき、コーシ歪が回転に対して

等価的に不変になるように補正を入れて線形スキームで非線形有限要素法を近似する Co-Rotaetd FEM[26] を基本とした [11]。この補正がない場合、血管等の大変形時、血管の体積が著しく増加する問題が出る。

$$M\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{F} - C\dot{\mathbf{U}} - RK(R^{-1}\mathbf{x} - \mathbf{X}) \quad (3)$$

ここで \mathbf{x} は変形後の節点位置ベクトル (各節点変位 x_i の組み合わせ)、 \mathbf{X} は変形前の同様の節点位置ベクトル、 \mathbf{U} は生体モデルデータの節点変位ベクトル、 R は要素毎の変形を極分解して回転部を抜きだしこれを集積したもの [11]、 M は質量マトリクス、 \mathbf{F} は外力ベクトル、 C は粘性マトリクスである。また、 K は全体剛性マトリクスであり、変位を表すマトリクス B と臓器の硬さ等の物性を示すマトリクス D を用いて、 B^TDB の有限要素内 V_e における体積分から求まる。 M および C に関しても同様に領域内の体積分による。

式 (3) を時間方向に離散化すると式 (4) となる。

$$(M + \Delta t C + \Delta t^2 K)U^{i+1} = (2M + \Delta t C)U^i - MU^{i-1} + \Delta t^2 F \quad (4)$$

ここで、上添え字の i は時刻、 Δt は計算の時間キザミを示す。

最終的に式 (4) は、式 (5) の連立方程式に帰着する。

$$AU^{i+1} = F \quad (5)$$

3.3 ヒューマンインタフェース技術

内視鏡手術の模擬において、触覚は重要なファクタである。触覚提示するための手術シミュレータ本体の制御ブロック図を図 3 に示す。図において、 \mathbf{x} は位置、 \mathbf{f} は力、 ξ は角度、 J_ξ はヤコビ行列の一般化逆行列を示す。模擬の基本として、力の伝達はモデルフィードフォワードオープンループ制御 (Model-feed-forward open-loop) である。また、力制御方式は、ポジションを与えて力の発生を制御するインピーダンス制御 (impedance control) を基

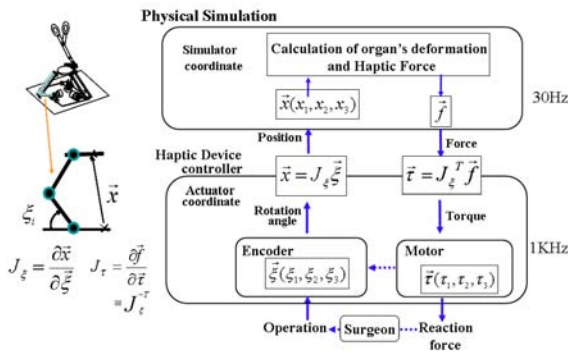


図3 手術シミュレータ本体の制御ブロック図: x は位置, f は力, ξ は角度, J_ξ はヤコビ行列の一般化逆行列を示す.

本とする [12, 27]. この系に術具操作者が入ることにより Human-in-the-loop のクローズドループとなる. 従って, 現在の位置からモデルにより計算された接触による反力と, この力の指示より動かされた力覚装置の移動した位置との差異から操作者が力覚を得る. なおモデルの更新レートは 30Hz, 力覚装置の更新は 1 kHz である.

4 臨床評価試験

開発したシステムは, 術前計画型手術シミュレータである. このシステムに対して, 医師による運用評価は, 実用化の上で非常に重要である. そこで, 共同研究先の横浜市立大学附属病院泌尿器科で臨床評価試験を行い, 術前計画型システムとしての有効性を検証した.

4.1 評価項目

本システムの術前シミュレーションにより, 実手術への有効性を評価する. 以下の3つを評価項目とした.

- (1) 実手術と生体モデルデータの比較 生体モデルデータと実手術で見られる生体の解剖的構造の比較を行う. 実手術と解剖的構造が同じ生体モデルデータが構築できていれば, 術前シミュレーションは有効といえる.
- (2) 生体モデルデータ生成装置評価 生体モデルデータ生成の作業時間を計測し評価する. また, 3.1 節に示した phase1 と phase2 のシステムを比較する. phase2 の機能 (グラフカットアルゴリズム + UI 特化) は, 共同研究先である理研が開発したソフトウェア V-Tracer[24, 25] に実装されている. phase1 のシステムと, この V-Tracer を比較することで, phase1 から phase2 への更新に伴う臓器抽出作業時間短縮の効果を評価した.
- (3) 術者所見 シミュレータの模擬挙動と実手術の比較と術前シミュレーションとしての有効性を執刀医のコメントで評価する. 手術の操作や, 臓器の挙動などを定量的に評価し, シミュレータと比較する手法は確立さ

表3 臨床試験の実施内容

	症例 1	症例 2	症例 3	症例 4	症例 5
試験日	'11/2/15	'11/3/22	'11/4/18	'11/6/21	'11/9/14
手術日	'11/2/17	'11/3/23	'11/4/20	'11/6/22	'11/9/15
術式	腹腔鏡	後腹膜	後腹膜	後腹膜	後腹膜
	水腎症	尿管癌	腎部分切除	全摘	全摘
対象臓器	左	右	右	右 (内臓逆位)	左
執刀医	ベテラン医師	中堅医師	ベテラン医師	ベテラン医師	中堅医師

れていないため, 実手術の執刀医が術前にシミュレータを操作し, その主観的評価を用いた.

4.2 試験手順

以下の3つの手順によって臨床試験を行った.

- 手順1 手術対象の患者の CT データから生体モデルデータを作成する. 対象臓器の教師点指示は, 医師が行い, それを元にシステム技術者がデータ生成操作を行う. このときのデータ作成時間を測定する.
- 手順2 執刀医が, 手術前にシミュレーションを実施する.
- 手順3 実手術の後, シミュレータの評価を行う. 実手術映像とシミュレータモデルの比較および, 執刀医の術后感想アンケートを行う.

臨床試験の実施内容について, 表3にまとめる. 試験期間は 2011 年 2 月~9 月にかけて, 5 例を行った. 術式に関しては, 腹側からアプローチする腹腔鏡と, 背中側からアプローチする後腹膜の2種類がある. 対象臓器は, 左右の腎臓である. 症例4は内臓逆位であり, 患者にとっては右側の腎臓を手術するが, 解剖構造的には左側の腎臓である. この術式と対象臓器は, 生体モデルデータ生成処理における, 拳上シミュレーションの設定条件となる. 執刀医は, ベテラン医師と, 症例数の少ない中堅医師の2者で行った.

開発した手術シミュレータは根治的腎摘出 (全摘) 手術を対象としている. 症例1~3では, 全摘手術ではないため, 共通処理となる腎門部付近の処理 (リンパ等の結合組織を剥離し, クリップ, 切断等の血管処理) を行い, また必要に応じて, 模擬カメラを操作することで, 模擬視界から実手術のイメージ作りに活用し, その術前シミュレーションとしての効果を評価した.

5 臨床評価結果

5.1 実手術と生体モデルデータとの比較

図4~図8に手術シミュレーション画像と実際の手術ビデオ映像との比較を示す. 図中の A は腎動脈, V は腎静脈, GV は性腺静脈, U は尿管, LV は腰静脈, IVC は大静脈, Aorta は大動脈を表す. 以下に症例毎の整合性を評価する. 図4の症例1においては, シミュレータでは, 腎盂尿管移行部の背側を走行していた腎静脈が, 実際は腹側を走行していた. 図5の症例2においては, 主要な構造物

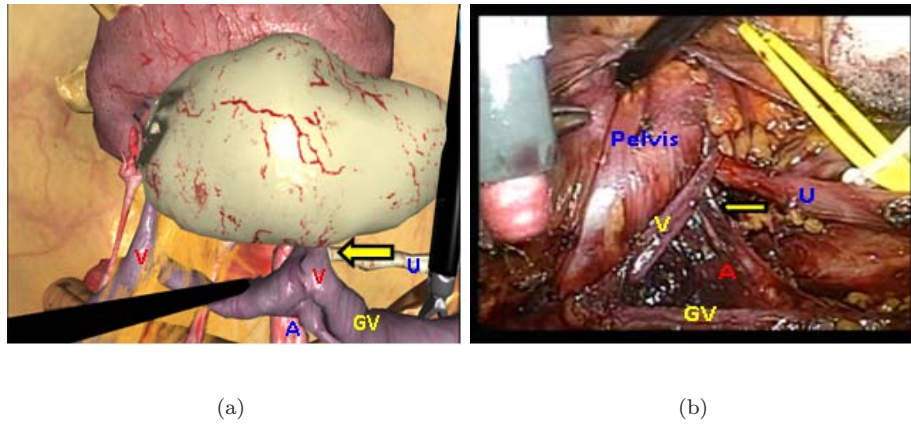


図4 手術シミュレーション画像と実際の手術ビデオ映像との比較(症例1)(a)手術シミュレーション画像, (b)実際の手術のビデオ映像

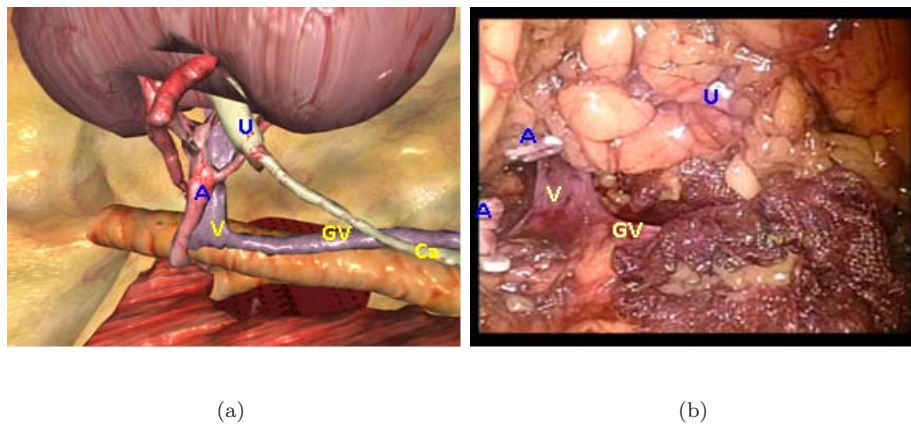


図5 手術シミュレーション画像と実際の手術ビデオ映像との比較(症例2)(a)手術シミュレーション画像, (b)実際の手術のビデオ映像

表4 医師による生体モデルデータと実際の血管の整合性評価: は一致, は一部不一致, ×は完全不一致, -は比較不能

比較臓器	症例1	症例2	症例3	症例4	症例5
腎動脈					
腎静脈					
性腺静脈					
腰静脈	-				
尿管					
腫瘍位置	-				

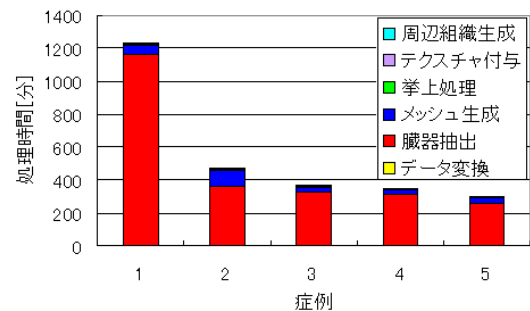


図9 生体モデルデータ生成における処理時間

に違いは見られず良好な結果であった。図6の症例3においては、シミュレータでは腎静脈から出ていた性腺静脈が、実際には下大動脈から出ていた。図7の症例4においては、主要な構造部に違いは見られず良好な結果であった。本症例は、内臓逆位であり、術前シミュレーションの恩恵が大きかった。図8の症例5においては、尿管と性腺静脈の位置関係が逆であった。

これらをまとめ、臓器毎に生体モデルデータと実際の血管の整合性を評価したものが、表4である。症例1の腰静脈は、実際の手術で露出しなかったため、比較不能だった。またこの症例は水腎症であり腫瘍が存在しないため、腫瘍

位置の評価は不要であった。モデル生成の抽出漏れは無く、ほぼ手術と同じ状況を再現することができた。ただし、症例1と3のように、細い腎静脈や細い静脈で、一部不一致が見られた。これは、CTで造影剤の分布が均一とならないため抽出が困難であったためと考えられる。これらを生体モデルデータ生成時に補完するには、作業者の技量、医学的知見によるところが大きいと考えられる。

5.2 生体モデルデータ生成装置評価

(1) 全処理時間

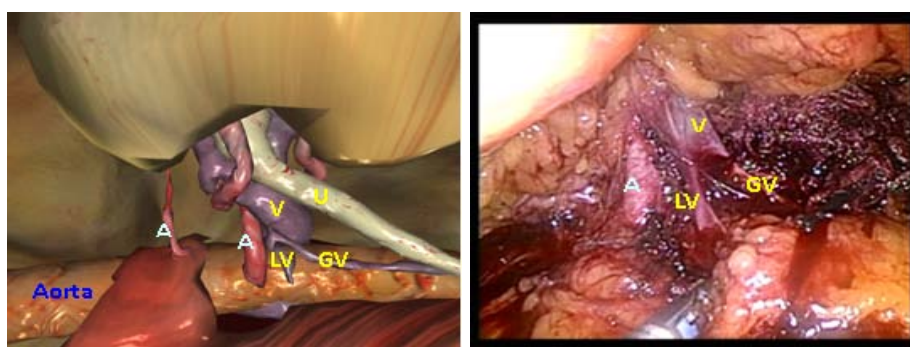
図9に生体モデルデータ生成における処理時間を示す。これは、3.1節に示したCTデータから生体モデルデー



(a)

(b)

図6 手術シミュレーション画像と実際の手術ビデオ映像との比較(症例3)(a)手術シミュレーション画像，(b)実際の手術のビデオ映像



(a)

(b)

図7 手術シミュレーション画像と実際の手術ビデオ映像との比較(症例4)(a)手術シミュレーション画像，(b)実際の手術のビデオ映像

タを生成するまでの処理時間を示したものである．症例1が1,200分(=20時間)かかっており，その他の症例では，420分(=7時間)以下となっている．どの症例においてもセグメンテーション(臓器抽出)処理が，全体の8割を占めていることがわかる．

(2) 臓器毎のセグメンテーション処理時間

表5に，臓器毎におけるセグメンテーション処理時間を示す．症例1は，CTデータから抽出判断が難しく，18時間かかった．その他については4~6時間である．操作者はすべて同一者で行っており，操作の慣れもあって，処理時間は短縮傾向にある．作業時間の中で，主に腎臓，筋肉，骨，肝臓等の体積のある臓器の抽出に時間がかかっている．また，腎静脈の抽出にも時間がかかっている．これは，CTの撮影タイミングによるもので，血管造影剤が動脈にあるときに撮影しているため，動脈は鮮明に写るが，静脈は不鮮明になるためである．

(3) phase1 と phase2 の比較

表5における，症例4，5のphase1と記載した列が，3.1節に示したシステムによる抽出作業時間であり，

phase2と記載した列が，V-Tracer[24, 25]を用いたときの抽出作業時間である．比較結果を以下に記述する．

全体の処理時間

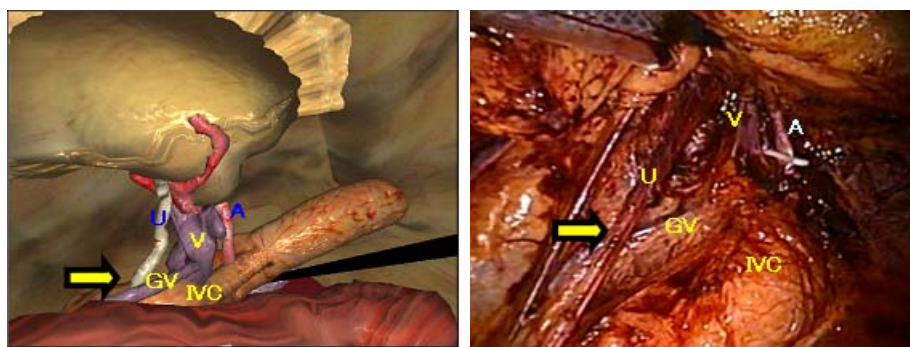
合計時間では，phase1では，3時間36分，5時間1分の作業時間がかかったが，phase2では1時間以内に短縮することができた．

体表の抽出処理

phase2で，体表を抽出しなかったのは，適切な手法が実装されていないためである．phase1で，体表は輪郭抽出アルゴリズムを用いており，症例5では体表の輪郭が鮮明な画像データが得られたため，ほぼ自動で抽出できたが，そのほかの症例では輪郭が不鮮明な箇所があったため，その修正を手作業で行う必要があり，数10分かかっている．

腎臓等の抽出処理

phase1とphase2との違いは，腎臓，筋肉，骨，肝臓等の体積のある臓器において顕著である．(phase1が数10分かかけているのに対し，phase2は数分)．phase2は，これらの抽出に“グラフカットアルゴリズム”を用いており，体積の大きな臓器に非常に有効なアルゴ



(a) (b)

図8 手術シミュレーション画像と実際の手術ビデオ映像との比較(症例5)(a)手術シミュレーション画像，(b)実際の手術のビデオ映像

表5 臓器毎におけるセグメンテーション処理時間(分)

対象臓器	症例1	症例2	症例3	症例4		症例5	
				phase1	phase2	phase1	phase2
大動脈	13	11	9	6	1	2	1
大静脈	3	7	7	2	3	1	3
腎臓	40	36	33	39	5	27	2
腎動脈	203	33	21	6	8	8	1
腎動脈2	-	-	-	7	2	-	-
腎静脈	57	54	46	14	3	23	4
腎盂腫瘍	-	-	-	5	2	-	-
尿管	30	14	5	3	1	2	4
性腺静脈	65	3	3	2	2	2	2
腰静脈	-	1	-	5	2	2	-
体表	21	20	13	46	-	1	-
筋肉1	161	70	64	76	7	56	3
筋肉2	20	32	18	22	2	23	4
骨	22	29	3	15	7	21	10
肝臓	450	11	44	43	5	33	4
脾臓	-	-	-	9	4	16	2
合計	18時間05分	5時間21分	4時間24分	5時間01分	51分	3時間36分	41分

リズムといえる。

血管や尿管の抽出処理

CTの断層画像の数枚に一箇所、点を打ち、それらの点群をスプライン補完する手法を、両ツール共用しており、大きな差はない。phase1とphase2は同一作業者が操作しているので、後に作業したほうが、先に作業したときの経験を生かして効率よく作業できる。そのため、症例4ではphase1, phase2の順で作業したため、後者に行ったphase2の方が早い(尿管を例にphase1が3分に対し、phase2は1分)。症例5ではphase2, phase1の順で作業したため、後者に行ったphase1の方が早い(尿管を例にphase1が2分に対し、phase2は4分)。

総合評価

腎臓等の抽出処理において、“グラフカットアルゴリズム”の有効性が確認された。phase2により、作業時間

表6 生成した生体モデルデータの有限要素数

比較臓器	症例1	症例2	症例3	症例4	症例5
腎臓	4835	3634	2557	3737	5385
大動脈	5962	5600	2202	2078	18461
大静脈	4011	7464	4598	3896	6738
腎動脈	3563	2984	1229	2329	3446
腎静脈	3651	2002	566	1611	2283
尿管	3474	2889	626	1419	1029
筋肉	2186	30751	9184	5404	2868
合計	27682	55324	20964	20474	40210

を約2時間短縮することが可能と判明した。

最後に、生成した生体モデルデータの有限要素数を、表6に示す。20,000~50,000要素数のサイズで生体モデルデータを生成した。

5.3 術者所感

執刀医による術後アンケートについて、表7に示す。基本的には“実際の手術とほぼ整合性があり、術前のイメー

表 7 執刀医による術後アンケート

	術者コメント	備考
症例 1	性腺静脈の分岐について効果あり	
症例 2	性腺静脈の起始部の情報もシミュレータの通りであり、経験の浅い術者にとっては腎内部の血管の情報は安心感があってよい。	
症例 3	腎動脈のブルドッグカンシの位置については参考になった。剥離操作が実際と同じようにはならず、腫瘍のイメージングができなかった。腰静脈もモデル化すべきであった。	挙上処理のパラメータ同定が不十分。腰静脈は判別困難。
症例 4	内臓逆位は術者にとって初めてだった。内臓逆位症例に対して、術前イメージをしっかりと持つことができた。	
症例 5	手術 20 例目の術者にとっては有益。ベテランにとっての有用性は今回のケースでは？（単純なため有効性は低い）	

ジ作りに有用” とのことであった。

症例 3 においては、剥離操作が実際と同等とならなかったが、モデル生成の挙上処理で、腎臓を移動させるパラメータが実際に即していなかったことが原因である。症例 3 では、腎臓を鉛直上方向から 60 度腹側へ移動させたが、この角度が大きすぎたため、実際と一致しなかった。症例 4、症例 5 は 0 度（鉛直上向）にパラメータを修正したことで、解消された。このようなシミュレータ固有のパラメータ、初期条件、環境条件は、実際の手術を定量化できず不明な点が多く、仮定値で設定し、影響の簡略を行った。今後は、この臨床試験を通じて、明らかにしていくことが必要である。

臨床 5 のコメントにあるように、多くの症例を経験しているベテランの場合、手術への慣れがあるため、オーソドックスな症例と臓器形状に関しては、術前リハーサルの効果は顕著でない。一方で症例 4（内臓逆位）のように、稀なケースに対しては大きな効果が期待できる。

6 むすび

従来のパネモデルで課題となっていた数値的不安定性を解消するために、有限要素モデルを用いた手術シミュレータシステムを開発した。これにより、患者の CT データから生体モデルデータを生成し、患者固有の血管本数、走行状態を再現した術前シミュレーションが可能となった。

このシステムの有効性を評価するために、横浜市立大学附属病院泌尿器科で臨床評価試験を行った結果、CT から生成した生体モデルデータと実手術で確認した臓器との間で、形状、数量、位置関係についてほぼ一致していることが確認され、術前シミュレーションを行うことで、実手術のイメージを得る効果があった。特に、内臓逆位のような稀な症例について、ベテランの医師でも有用との意見であった。

本試験では、筆者らシステム開発者が生体モデルデータ生成操作を行ったが、今後は対象ユーザである医師（横浜市大）に作業を依頼し、非専門家に対する操作性評価および機能改善点の洗い出しを行い、更なる作業時間の短縮を図る。



図 10 製品化したシミュレータシステム

シミュレータにおいては、アンケートによる定性的な評価であったが、今後は定量的な評価法を確立したい。現在、手術操作や、術中の挙動の測定を計画実施中である。この定量評価を元に、シミュレータパラメータの同定を行い、更なる模擬向上へと繋げたい。さらに、各臓器の物理的性質を CT/MRI 値の情報から得る方法を確立し、患者固有の組織毎の物理特性を模擬し、実手術と同等の状況を、仮想空間上で再現したい。

上記より、「術前計画型シミュレータ」としては、課題がある。しかし、「教育訓練型シミュレータ」用途に限定し、これまでの技術をもとに (1) 階層化、モジュール化によるソフトウェア整理、(2) 小型化、低価格化、意匠性を考慮した筐体設計を行い、製品化した (図 10)。本製品は、CT/MRI データからモデルを生成できるため、症例のバリエーションを豊富にでき、他社製品に対する大きな優位性を持っている。これにより医療教育分野へ参入していく。

謝辞

ご指導頂いた横浜国立大学名誉教授 土肥康孝先生；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 横山和秀先生、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、同生物情報基盤構築チーム チームリーダー 横田秀夫氏、同研究員 井尻敬氏；最後に、お世話になった OB の梶原景範氏、藤野勝氏、岡崎博善氏に深謝する。

参考文献

- [1] P. Meseure, J. Davenne, L. Hilde, J. Lenoir, L. France, F. Triguet, and C. Chailou, "A Physically-Based Virtual Environment Dedicated to Surgical Simulation," Proceedings of the 2003 international conference on Surgery simulation and soft tissue modeling 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ボリュー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)," 電子情報通信学会論文誌 D-II 情報システム, vol.87, no.1, pp.271-280, 2004 .
- [4] M. Nakao, K. Minato, N. Kume, S. Mori, and S. Tomita, "Vertex-preserving Cutting of Elastic Objects," Proceedings of virtual reality conference IEEE Virtual Reality, pp.277-278 2008.
- [5] 土肥康孝, 緒方正人, 長坂学, 菊川孝明, 坂本英男, "研究報告 手術シミュレ - タに関する基礎研究 2004 年 - 2009 年," 三菱プレジジョン, pp.1-189, 2009 .
- [6] 緒方正人, 長坂学, 乾谷徹, 菊川孝明, 坂本英男, 土肥康孝, "研究報告 手術シミュレ - タに関する基礎研究 その 2 2009 年度," 三菱プレジジョン, pp.1-69, 2010 .
- [7] 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," Visual Computing/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2010 情報処理学会, pp.21-31 2010 .
- [8] 菊川孝明, 緒方正人, 長坂 学, "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/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2007 情報処理学会, pp.129-134 2007 .
- [9] 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," 第 15 回計算工学会論文集, 第 15 巻, pp.115-118, 2010 .
- [10] M. Nagasaka, K. Takanami, S. Hongo, T. Terada, T. Kikukawa, and M. Ogata, "A Real-time Deformation Model using Patient-Specific Medical Data," SIGGRAPH 2007 posters, august 2007.
- [11] 乾谷 徹, 緒方正人, 長坂 学, 菊川孝明, 土肥康孝, "手術シミュレータへの応用を想定した大変形手法の評価と実装," 第 15 回計算工学会論文集, 第 15 巻 pp.456-459 2010 .
- [12] 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 ,
- [13] Symbionix 社, "Lapmentor," <http://symbionix.com/simulators/lap-mentor/>.
- [14] surgicalscience 社, "Lapsim," <http://surgical-science.com/productsmain/>.
- [15] CAE 社, "Lapvr," <http://www.cae.com/en/healthcare/laparoscopy.asp>.
- [16] 村木 茂, 喜多泰代, "3 次元画像解析とグラフィックス技術の医学応用に関するサーベイ," 電子情報通信学会誌 DII, vol.J87-D-II, no.10, pp.1887-1920, 2004 .
- [17] H. Delingette, "Towards realistic soft tissue modeling in medical simulation," Proceedings of the IEEE, pp.512-523, 1998.
- [18] T. Terada, M. Ogata, T. Kikukawa, S. Hongo, M. Nagasaka, K. Takanami, K. Kajihara, and M. Fujino, "Virtual Human Body using Haptic Devices for Endoscopic Surgery Training Simulator," Proceeding of ICM2007 4th IEEE International ConferenceIEEE, pp.1-5 2009.
- [19] H. Shimai, H. Yokota, S. Nakamura, and R. Himeno, "Extraction from Biological Volume Data of a Region of Interest with non-uniform Intensity," Proceeding of SPIE(Optomechatronic Technologies)SPIE, pp.60515(1)-60515(10) 2005.
- [20] 高波健太郎, 藤野 勝, 長坂 学, 菊川孝明, 緒方正人, "内部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," グラフィックスと CAD 研究会報告, vol.2009, no.12, pp.7-12, 2009 .
- [21] 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, "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," 三菱プレジジョン技術報告, 第 6 巻, pp.29-37, 2011 .
- [22] 長坂 学, 高波健太郎, 坂本英男, 菊川孝明, 緒方正人, "腹腔鏡下手術の状況を再現したシミュレーションモデルの構築," Visual Computing/グラフィックスと CAD 合同シンポジウム 2009 情報処理学会, pp.28-33 2009 .
- [23] E.J. Chen, J. Novakofski, K. Jenkins, and W.

O'Brien, "Young's Modulus Measurements of Soft Tissues with Application to Elasticity Imaging," Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol.43, no.1, pp.191-194, 1996.

[24] T. Ijiri and H. Yokota, "Contour-based Interface for Refining Volume Segmentation," Computer Graphics Forum, vol.29, no.7, pp.2153-2160, 2010.

[25] 上野大樹, 井尻敬, 井上雅弘, 田尻雄大, 大古美治, 横山和秀, 山中弘行, 佐野太, 林成彦, 中井川昇, 小川毅彦, 上村博司, 矢尾正祐, 窪田吉信, "3D model 作成ツール (V tracer) の腹腔鏡下腎手術シュミレータにおける有効性の検討," 日本 VR 医学会 第 11 回大会, Aug. 2011 .

[26] M. Müller and M. Gross, "Interactive virtual materials," Proceedings of Graphics Interface 2004 Canadian Human-Computer Communications Society School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, pp.239-246 2004.

[27] H. Maass, B.B. Chantier, H.K. Cakmak, and U.G. Kuhmapfel, "How to Add Force Feedback to a Surgery Simulator," Proceedings of the 2003 international conference on Surgery simulation and soft tissue modeling, pp.165-174, 2003.



坂本 英男 略歴

2007 年入社, 入社以来手術シュミレータの研究開発に従事 .



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, 2009 年から手術シュミレータの研究開発に従事 .



本郷 新 略歴

1990 年入社, 主にフライトシュミレータの開発設計に携わり, 現在は手術シュミレータの開発に従事 .



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ュミレータの開発設計に携わり, 現在は手術シュミレータの開発に従事 .

[執筆者紹介]



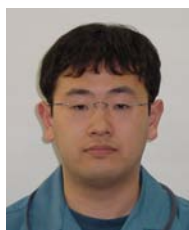
長坂 学 略歴

2001 年入社, フライトシュミレータの開発設計に携わり, 現在は手術シュミレータ開発に従事 .



寺田 尚史 略歴

1988 年入社, H-II ロケット地上設備, ETS-IV ランデブドッキングシュミレータ, ハプティックデバイスの研究開発に従事 .



高波 健太郎 略歴

2002 年入社, フライトシュミレータ及び鉄道シュミレータのソフトウェア設計に携わり, 現在は手術シュミレータの開発に従事 .



緒方 正人 略歴

1970 年入社, 主にフライトシュミレータの設計およびその構成技術に関する研究開発等に従事し現在に至る . 技術士 (情報工学), 工学博士

超小型衛星向けホイール 0.4Nm_s タイプの開発

田島 崇男, 須崎 祐多

要旨： 30kg～100kg 級の超小型衛星向けホイール 0.4Nm_s タイプを開発した．タングステン合金採用によるホイールの小型化，制御回路部のデジタル化による高機能化，アンギュラ玉軸受適用による高機械環境耐性を実現し，同程度の角運動量を有する海外製ホイールと比べ，搭載面積比で 34 % の小型化，28 % の機械環境耐性の向上を実現した．

1 まえがき

ホイールは人工衛星に搭載され，内部にある回転体を加減速することで，人工衛星の姿勢を制御するアクチュエータの一種であり，三軸姿勢制御を行う人工衛星には通常 3～4 式搭載されている．小中大型衛星向けのホイールとして，タイプ S (角運動量 5～10Nm_s 級)，タイプ M (角運動量 10～30Nm_s 級)，タイプ L (角運動量 30～80Nm_s 級) を JAXA 研究開発本部殿と開発し [1]，これまで衛星システムメーカーに供給してきた．しかし，「タイプ S」，「タイプ M」，「タイプ L」は角運動量及び外形寸法が大きくピギーバック衛星のような 30kg～100kg 級サイズの超小型衛星への搭載には不向きであり，超小型衛星への搭載に適した国産のホイールが存在しない．このような背景によって超小型衛星向けに需要がある角運動量 0.4Nm_s タイプのホイール開発に着手した．

超小型衛星向けホイールの開発はユーザの意見である人工衛星への搭載性，運用時の利便性を考慮し目標を立てた．人工衛星への搭載性については，タングステン合金採用によるホイールの小型化，アンギュラ玉軸受適用による高機械環境耐性により対応した．運用時の利便性については，制御回路部のデジタル化による高機能化により対応した．

以下，2 章ではホイールの搭載を，3 章では開発目標を，4 章では設計方針を，5 章では開発結果を述べる．

2 ホイールの搭載

超小型衛星はロケットの余剰能力を活用したピギーバック衛星が多く，ユーザ側の制約は質量よりも外形寸法が厳しくなる．そのため，ユーザ側のレイアウト設計の制約を最小化し，柔軟な角運動量設計が可能となるホイールを目指し取付面の面積を 72mm × 72mm とした．図 1 に人工衛星のホイール搭載例を示す．ホイールは人工衛星に 3～4 式搭載されるため，ホイール 1 式の小型化による搭載面積の削減は，搭載機器 3～4 式の搭載面積を減らす効果が期待

できる．

3 開発目標

超小型衛星向けホイールはロケット打上時の環境を考慮し 23Grms 機械環境耐性を持たせることとした．高い機械環境耐性を有するホイールはユーザシステム側のダンパ等ホイールの保護手段が不要となり，レイアウト設計上の制約も小さくできる．さらに人工衛星で大きな角運動量が必要となる場合は，ホイールの小型化で空いたスペースを有効活用し，ホイールを複数台並列に配置するなどの柔軟な角運動量設計も可能となる．表 1 に超小型衛星向けホイールの機械的開発目標を示す．また，運用時の利便性を図るためホイールの制御部にマイクロプロセッサを用い

- ① ユーザインタフェースのデジタル化
- ② モータ制御演算のデジタル化
- ③ ホイールシステムの高機能化

を行うこととした．

4 設計方針

4.1 ホイールの小型化

ホイールの小型化には回転体の外径寸法を小さくする必要がある．しかし，回転体の外径寸法を小さくした場合，必要な角運動量の確保が難しくなるため，密度の大きい材料

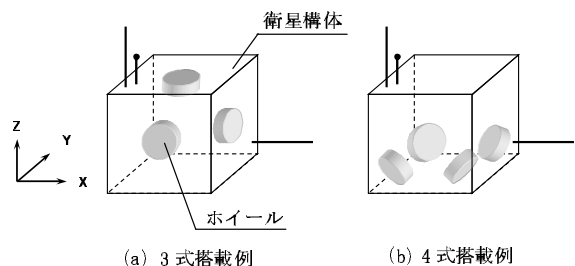


図 1 人工衛星のホイール搭載例

を回転体に使用するのが一般的である。角運動量 0.4Nm_s としたときのタングステン合金の場合とステンレス合金の場合の、ホイールの取付面寸法とホイールの質量との関係を図 2 に示す。開発目標仕様である角運動量 0.4Nm_s 及び取付面の面積 72mm × 72mm を実現するため回転体にタングステン合金を採用した。タングステン合金は従来のホイールで使用していたステンレス合金に対して 2 倍以上の密度を有しており、必要な角運動量の確保及びホイールの小型化の点で有利である。

但し、取付面の面積低減を優先したため、質量は最適値より大きめの 1.2kg 以下となっている。

この結果、超小型衛星向けホイールは、回転体材料にタングステン合金を採用することで、海外製ホイールと比較して、搭載面積比で 52 % の小型化を実現した。

表 1 超小型衛星向けホイールの機械的開発目標

項目	性能・諸元	
	超小型衛星向けホイール	比較対象として海外製ホイールを示す
角運動量	0.4Nm _s	0.4Nm _s
制御トルク	0.01Nm	0.01Nm
外形寸法	W72×D72×H70	直径 100×H90
質量	1.2kg 以下	1kg 以下
機械環境	23Grms	18Grms

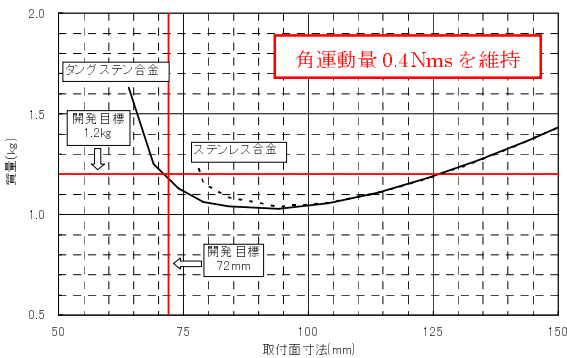


図 2 ホイールの取付面寸法とホイールの質量との関係

4.2 制御回路部のデジタル化/高機能化

図 3 に超小型衛星向けホイールの機能ブロック概要を示す。当社の従来型ホイールとは異なり、制御回路部に MPU (マイクロプロセッサ) を搭載している。図 4 にホイール制御回路部の外観を示す。

(1) ユーザインタフェースのデジタル化

ユーザシステムとのインタフェース部にシリアル通信機能を採用し、ホイールに対する指令及びホイールからの応答データをデジタル化した。通信インタフェースのデジタル化によって、ユーザシステムのハードウェアリソースを低減できる。また、コマンド及び応答データの種類を従来型ホイールより増やすことが可能となり、ユーザの利便性を高める設計とした。

(2) モータ制御演算のデジタル化

モータの回転数及び電流をデジタルデータとして MPU に取り込み、モータ制御演算をデジタル化した。これによって制御に関わるパラメータの変更が容易になり、機能

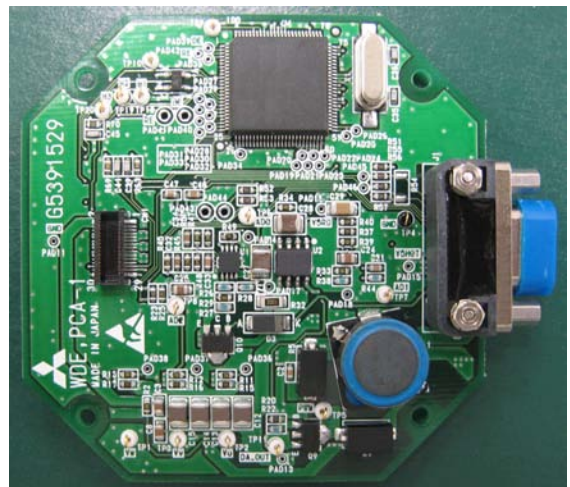


図 4 ホイール制御回路部の外観

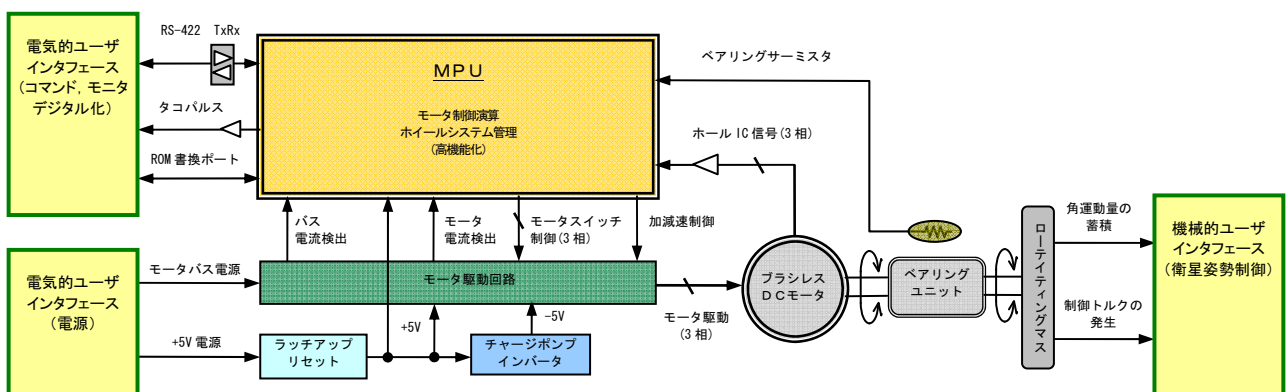


図 3 超小型衛星向けホイールの機能ブロック概要

改修等の工程短縮を実現した。さらに、回転数・電流検出等の機能を高度化(状態推定アルゴリズム等の実装)し、高精度のモータ制御を可能にした。

(3) ホイールシステム全体の高機能化

MPUを採用したことによって、ホイールシステムの異常検知とその対応を自立化させ、ユーザ計算機側の負荷を低減した。また、制御計算を含むシステム内のパラメータをコマンドで変更可能とし、ユーザシステムの仕様変更や打上後の軌道上修正等、柔軟に対応できる設計とした。

4.3 高機械環境耐性

ホイールの機械環境耐性は、環境印加時の負荷荷重とベアリングの静定格荷重で決定される。環境印加時の負荷荷重は回転体の質量と加速度から算出できる。一方、ベアリングの静定格荷重は、内外輪及びボールの幾何学的形状で決定されるため、ボールを多く組み込むことができ、静定格荷重が大きいアンギュラ玉軸受が高機械環境に対して有利である。アンギュラ玉軸受は内外輪の一方にカウンタポアを有しており、カウンタポア側からボールを組み込むため、ボールを多く実装できる。さらにアンギュラ玉軸受は複数組合せて使うことで環境印加時のアキシャル荷重、ラジアル荷重、モーメント荷重の負荷能力を向上できる。そのため、超小型衛星向けホイールのベアリングはアンギュラ玉軸受を採用した。ベアリングは23Grmsの環境印加を想定した負荷加重を回転体の質量と加速度から算出し、その荷重を上回る静定格荷重を有するものを選定した。図5に選定したベアリングの外観を示す。

5 開発結果

表2に開発目標と開発試験結果の対比を示す。開発試験結果は、開発目標仕様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6に超小型衛星向けホイールの外観を示す。



図5 選定したベアリングの外観

表2 開発目標と開発試験結果の対比

項目	性能・諸元	
	開発目標値	開発試験結果
角運動量	0.4Nms	0.4Nms
制御トルク	0.01Nm	0.01Nm
外形寸法	W72×D72×H80	W72×D72×H70
質量	1.2kg以下	1.06kg
機械環境	23Grms	23Grms

6 むすび

超小型衛星向けホイールの開発を行った結果、タングステン合金採用によるホイールの小型化、制御回路部のデジタル化による高機能化、アンギュラ玉軸受適用による高機械環境耐性を実現することができた。今後、ホイールの寿命評価を開始する予定である。

本開発で得られた成果を活用し、顧客の要望に添えていく所存である。

謝辞

本ホイール開発の機会をいただきましたJAXA 研究開発本部宇宙実証研究共同センター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。

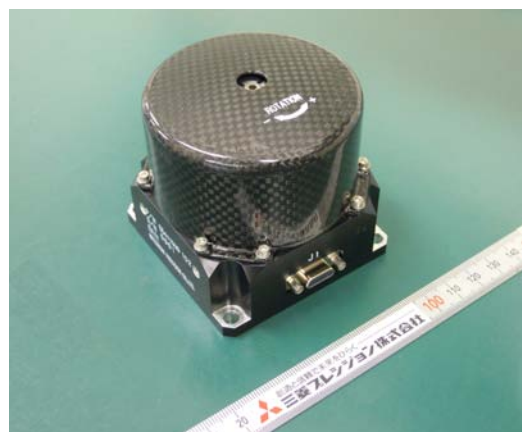


図6 超小型衛星向けホイールの外観

参考文献

- [1] 村上尚美，河原宏昭，中村揚介，井上浩一，平子敬一，JAXA 研究開発本部宇宙実証研究共同センター，田島崇男，須崎祐多，三菱プレシジョン株式会社，“小型衛星用小型高角運動量ホイールの開発，” 第 55 回宇宙科学技術 連合講演会公演集，2011． 2A15 (JSASS-2011-4248) ．

[執筆者紹介]



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．



須崎 祐多 略歴

2009 年入社，人工衛星に搭載される姿勢制御用アクチュエータの回路及びソフトウェア設計に従事．

低ノイズスイッチトキャパシタ CV-IC を適用した 振動型 MEMS ジャイロ

番 政広, 柴尾 新路, 内村 明高, 小林 健二, 福田 智洋, 中下 修治

要旨: 姿勢制御やロール角制御のセンサとして,慣性計測装置(IMU)に搭載される検出素子にMEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を適用した振動型MEMSジャイロに関する報告である。振動型MEMSジャイロとして電磁駆動-静電容量検出方式を採用し,容量変化の検出に新規開発のスイッチトキャパシタ型CV変換器を適用して,ジャイロの高精度-低ノイズ化を図った。その結果,角速度計測範囲±100deg/secにおいて,バイアスショートターム安定性18deg/h@1sec,アラン分散極小値約3deg/h(25)の性能を達成した。

1 まえがき

1980年代後半から現代まで発展を遂げているMEMS(Micro Electro Mechanical System)技術を適用したジャイロが民生,自動車向けに実用化されている。MEMS技術は,半導体の製造工程に用いられる成膜,露光,エッチングなどによる数ミクロンオーダーの微細加工技術を利用し,微小薄膜構造を作製するサーフェスマイクロマシニング技術やシリコンウエハをDRIE(Deep Reactive Ion Etching)プロセスなどにより深掘り加工し,数十~数百ミクロンオーダの厚みのある機械的構造体を作製するバルクマイクロマシニング技術などから構成される。センサ関連としては主に,圧力,流量センサ,加速度センサ及び赤外センサ,他の分野では,インクジェットプリンタのヘッドや投写型プロジェクタなども既に実用化され, MEMS技術はデバイスの小型化,低コスト化,さらには省エネルギー化に貢献している[1]。本稿では,これらの特徴を有するMEMS技術を適用してジャイロ素子を小型化し,さらに検出容量を電圧変換する新規低ノイズのCV ICを開発して,低ショートターム安定性を実現した飛翔体向けの振動型MEMSジャイロについて述べる。

第二章で, MEMSジャイロの検出原理とその構造,第三章では,開発,製品化を行ったジャイロの具体的な性能につき述べる。

2 各種ジャイロ及び振動型ジャイロ検出原理とその構造

宇宙,防衛などの分野において,衛星,ロケットやミサイル及び砲弾などは,慣性空間に対するこれら飛翔体の姿勢を検知するためにジャイロを搭載した慣性計測装置(IMU: Inertia Measurement Unit)が利用されている。これら慣性計測装置に内蔵されるジャイロについては,光学式ジャイロ

としてリングレーザジャイロ(RLG: Ring Laser Gyro)や光ファイバージャイロ(FOG: Fiber Optical Gyro)があり,従来から衛星姿勢制御に適用されている機械式(回転式)ジャイロとしては,マルチセンサ,中精度及び高精度TDG(Tuned Dry Gyro)[2]などがある。図1に,各種ジャイロの適用範囲として,入力角速度(deg/s)を横軸に,バイアス安定性(deg/h)を縦軸にし,当社の既存ジャイロ及びMEMSジャイロ性能の位置付けを示す。

2.1 振動型ジャイロの検出原理と素子構造

(1) 検出原理

図2に検出原理となるコリオリ力,図3には,振動型ジャイロの原理と構成を示す。回転座標系上の質量体には慣性力として遠心力が働くが,コリオリ力は,回転座標系上で

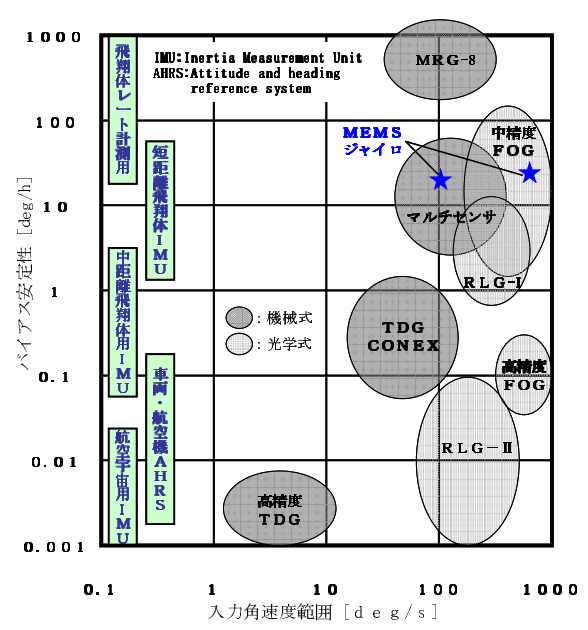


図1 各種ジャイロの適用範囲

質量体が移動した際に移動速度 V に直行する方向に発生する慣性力である。この慣性力を利用するため、振動型ジャイロでは、最大速度 V で駆動方向 X に振動する駆動フレーム内に質量体 m がコリオリ力を受ける Y 方向に変位可能な様に検出用パネで支持された構造を採用する。角速度 Ω_z が生じた場合に発生する質量体 m の Y 方向振動変位を計測できれば、角速度 Ω_z を知ることができる。

(2) MEMS ジャイロの素子構造

図 4 に MEMS ジャイロの素子平面構造を示す。Si 基板を構造材料として利用し、図 3 に示した構成図に基づき、駆動フレーム、駆動用パネ、検出質量、検出用パネをパルクマイクロマシニング手法を利用して一体構造として作製した。図 3 との構成の違いは、駆動フレーム、検出質量及び各パネで構成される振動系を左右に設け、左右駆動フレームが逆相共振で振動可能な様に、左右の駆動フレームは連結パネで結合される構造を採用した。

一方、駆動及び駆動速度検出手段として、磁界中の電流経路に作用する電磁力及び磁界中の導体移動により発生する誘起電圧を利用するため、駆動フレーム上には、駆動用メタル配線及び速度モニター用メタル配線を設けている。

検出質量 m の Y 方向変位は、検出質量体内側に平行平板型の検出用可動電極と固定電極を設け、その間の容量変化で検出する。なお、左右の駆動フレームは、電磁力により逆相で駆動されるため、検出質量 m には、逆相の変位が発生する。この逆相の変位により逆相の容量変化が発生

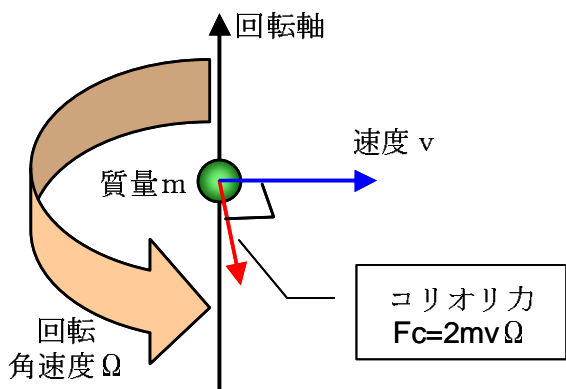


図 2 コリオリ力

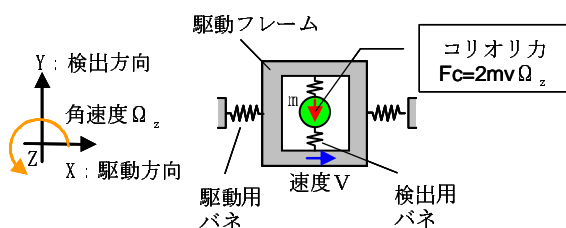


図 3 振動型ジャイロの原理と構成

し、これらを後述する C V 回路 (Capacitance to Voltage Convertor) にて差動容量変化として処理することで、同相変位 (Y 方向外乱振動要因) の影響を低減することができる。図 5 に MEMS ジャイロ素子と容量検出電極の詳細を示す。

2.2 駆動-検出回路構成端

(1) 全体の回路構成

図 6 にジャイロの回路構成ブロックを示す。角速度を高精度に検出するためには、コリオリ力により発生する可動電極変位に依存した容量変化を低雑音で検出する必要がある。回路構成としては、駆動フレームを常に一定振幅及び左右駆動フレーム振動系の共振周波数で振動させるために必要な駆動部と、アト (1×10^{-15}) ファラッドという極めて小さい容量変化を検出し、デジタルビットに変換する検出部から構成される。具体的には、駆動フレーム振動系共振周波数に同調発振する位相制御回路 PLL (Phase Lock loop), その振動振幅 (速度振幅) を常に一定にする電圧制御回路 AGC (Automatic Gain Control), 発生した容量変化を低雑音回路で高感度に電圧変換する C V 回路, 駆動周波数で変調されている角速度信号を同期検波する復調器 (Demodulator), 及び検波デジタル値に信号処理を施して

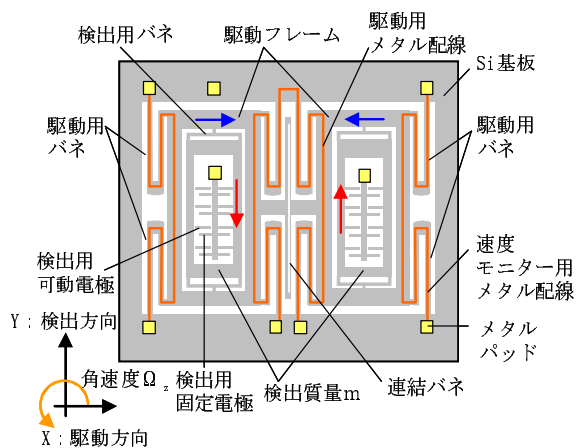


図 4 MEMS ジャイロの素子平面構造

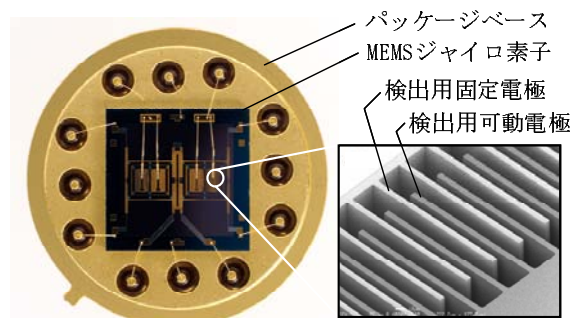


図 5 MEMS ジャイロ素子と容量検出電極の詳細

インタフェースより出力するデジタルインターフェース部 (Digital Interface) からなる。PLLとAGCは共にFPGA (Field Programmable Gate Array) によりデジタル回路で実現した。CV回路は超低雑音及び外乱に強い全差動型電流検出ASICを開発しMEMSの近傍に配置した。

(2) CV回路 (CV-IC)

・回路方式とプロセスの選定

図7にCV-ICの回路構成、図8に動作タイムチャートを示す。高速のクロックにより開閉するスイッチSW1とSW2によりMEMSの容量変化Cをリファレンス電圧V_{ref}で充電し、その電荷Qの転送動作によって時間離散的に電圧に変換して検出するスイッチトキャパシタ型のCSA (Charge Sensitive Amplifier)、微小な電圧出力を任意に増幅するGCA (Gain Control Amplifier)、離散的な信号を復調して連続化するサンプルホールド回路及び後段のADC (Analog-to-digital converter) での折り返し雑音を防ぐLPF (Low Pass filter) 回路からなる [3]。

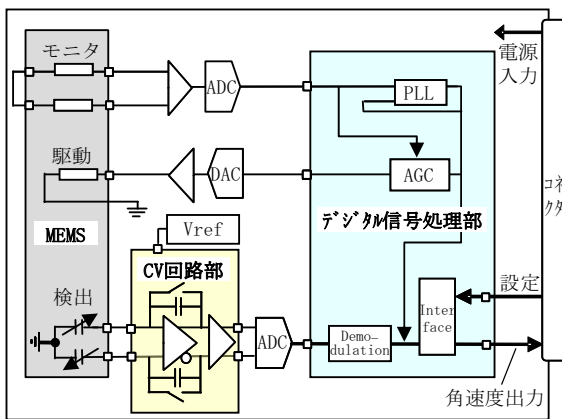
・雑音と線形性の設計

採用したスイッチトキャパシタ方式は、セッティング (電荷の充電と転送速度) が十分であれば出力はリファレンス電圧値V_{ref}と帰還容量C_fで決定されるDC動作となるため線形性に優れ、高い周波数で変調されることで回路の

低域雑音 (1/f 雑音) を回避することができ、またリーク電流などの連続的な非理想動作を考慮しなくて良いなどの長所がある。一方で、サンプルホールドにともなう熱雑音の折返しで雑音性能に限界があるという欠点があるが、雑音性能の優れた0.35 μC MOSプロセスを採用し、レイアウトでは初段トランジスタのサイズトレードオフを行い、入力換算熱雑音に関わるg_m (電圧電流変換効率)と、雑音利得に関わる入力容量の最適値を決定しCV-IC全体の入力換算雑音-170 dBV_{rms}/ Hzを可能にした。これによりショートターム安定性が10.3deg/hr@1secと汎用のCV-ICに比べ1/10のレベルを達成した。出力線形性については、スイッチトキャパシタ回路 [4] の長所を損なわないようスイッチにはオフの際にリーク電荷 (チャージインジェクション) が発生しないようP型とN型のFETを組み合わせた相補型のスイッチを用いるとともに、高い利得を有するフォールデッドカスコード型の増幅器を採用することで、汎用CV-ICに対しほぼ1/5に相当する0.03%が達成できた。

・CV-IC寸法と外觀

図9にCV-IC素子とパッケージの写真を示す。素子寸法は3.5 × 3.5 × 0.25 mmであり、40ピンQFN (プラスチックパッケージ5.5mm × 5.5mm × 1.0mm) に収納した。



PLL : Phase Lock Loop, AGC : Auto Gain Control
ADC : Analog to digital converter
DAC : Digital to analog converter

図6 ジャイロの回路構成ブロック

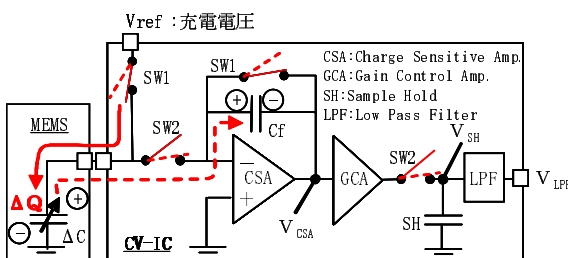


図7 CV-ICの回路構成 (差動回路を単相で簡易化)

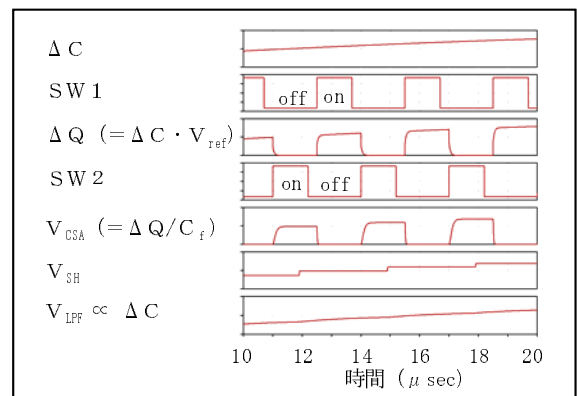
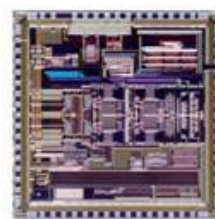


図8 CV-ICの動作タイムチャート



(a) 素子



(b) パッケージ化されたCV-IC

図9 CV-IC

3 ジャイロ性能

3.1 設計

表 1 に MEMS ジャイロ設計仕様 (Type A) を示す。ジャイロの重要な性能であるショートターム安定性 (雑音) と非線形性は MEMS 素子と CV - IC の性能に集約されている。

3.2 外観

図 10 に MEMS ジャイロと回路基板外観を示す。MEMS と CV - IC を搭載したアナログ系基板と FPGA や DAC などを搭載したデジタル系基板からなり、フレキシブル基板を用い折りたたむことにより、27 × 30 × 30mm の小型化を実現した。

表 1 MEMS ジャイロ設計仕様 (Type A)

パラメータ	性能	単位
MEMS 検出容量変化	31.6	aF/ (deg/sec)
CV CSA信号変換効率 (*1)	1.0	V/pF
CV GCA/LPF 利得	35	dB
スケールファクタ	1.8	mV/ (deg/sec)
CV 入力換算雑音	-170	dBVrms/√Hz
CV CSA雑音増倍 (*2)	7.5	dB
CV 折返し雑音	23	dB
CV GCA/LPF 利得	35	dB
出力雑音	-105.5	dBVrms/√Hz
等価角速度雑音 (*3)	0.0029	deg/s/√Hz
ショートターム安定性 (*4)	10.4	deg/hr@1秒積分
MEMS 非線形性	0.03	%
CV 非線形性	0.03	%
非線形性	0.06	%

*1 CV 変換効率 = MEMS 充電電圧 (Vd) / 帰還容量 (Cf)

*2 雑音増倍率 = 全入力容量 (Cs) / 帰還容量 (Cf)

*3 等価角速度雑音 = 出力雑音 / スケールファクタ

*4 ショートターム安定性 (1秒積分) deg/hr
= 等価角速度雑音 × 3600sec/hr ÷ √1sec



図 10 MEMS ジャイロと回路基板外観

3.3 ジャイロ目標性能

開発した MEMS ジャイロ目標性能を表 2 に示す。なお、参考として表 1 に記載の無い Type B, Type C の目標性能も示す。入力角速度範囲に応じた製品開発を行い、新規開発の CV - IC を搭載した慣性装置用 Type A (入力角速度範囲 FS : 100 deg/s) 及び Type B (FS : 800 deg/s) 及び汎用の CV - IC を用いた高レート計測用 Type C からなる。Type A と Type B は CSA の帰還容量と GCA の設定利得が異なる。いずれも動作温度範囲 - 10 以上 + 50 以下である。精度要求の厳しい Type A については出力非線形性 ± 0.1 % 以下、ショートターム安定性 (1 秒積分条件) で 30deg/h 以下、電源オンオフや温度サイクルなどのバイアス安定度は 20 deg/h 以下である。

3.4 性能

ジャイロの最終性能は 3.1 項に述べた設計仕様に電源ノイズ、駆動系のジッタ、インタフェースデジタルノイズなどの影響を受けたものとなる。慣性装置用 Type A について、図 11 に出力非線形性の温度依存性を示す。全温度においてほぼ設計仕様を実現し目標性能を満足する結果である。図 12 には、ショートターム安定性とバイアス安定性を示すアラン分散値 (Allan variance) () (25) を示す。ショートターム安定性は 1 秒積分において 18 deg/h であり、温度による変動もほとんど見られず目標性能を満足した。25 でのバイアス安定性は分散特性の極小値から約 3 deg/h、電源オンオフや温度サイクルなどの再現性は約 15 deg/h 以下であり、総合の安定性は 20 deg/h 以下を満足した。

4 むすび

本稿では、MEMS 技術を適用したジャイロ素子、さらに検出容量を精度良く電圧変換可能なスイッチトキャパシタ型の CV - IC、及びこれらを採用した振動型ジャイロに

表 2 MEMS ジャイロ目標性能

項目	慣性装置用		高レート用	単位
	Type A	Type B	Type C	
外形寸法	27×30×18		31×31×24	mm
消費電力	<0.9		<0.6	W
動作周囲温度	-10~50			℃
入力角速度範囲	±100	±800	±10,000	deg/s
出力非線形性	<±0.1		<±0.8	%
ショートターム安定性	<30	<90	—	deg/h@1sec
雑音	—	—	<1.6	deg/s@50ms
バイアス安定性	<20	<50	—	deg/h
インタフェース	デジタル			—

※Type B, Type C は参考性能

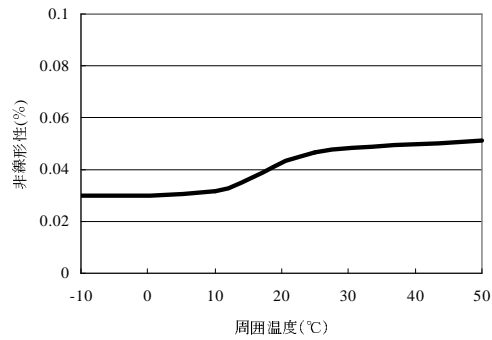


図 11 出力非線形性の温度依存性 (Type B)

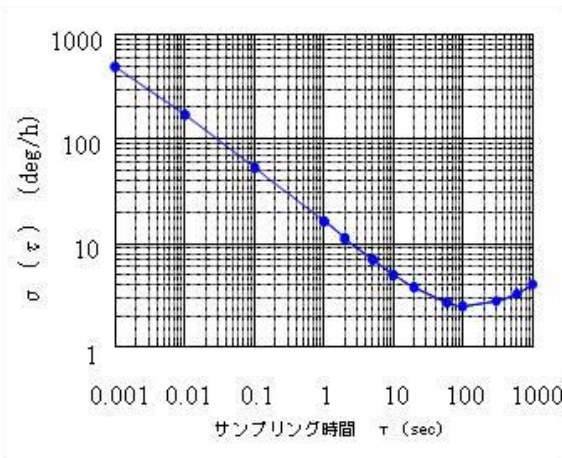


図 12 アラン分散値 (Type A, 25)

つき述べた . Type A (角速度計測範囲 $\pm 100\text{deg/sec}$) の仕様において, 出力非線形性 $\pm 0.1\%$ 以下, ショートターム安定性 (1 秒積分条件) で 30deg/h 以下, アラン分散極小値約 3deg/h (25) の性能を達成し, 短距離飛翔体向けとしては耐衝撃性も兼ね備えている . 今後は, 今回得られた知見をベースに, 人工衛星や中距離飛翔体などの姿勢制御向けとして, 中精度 FOG レベルのバイアス安定性を有する MEMS ジャイロ実現を目指す予定である .

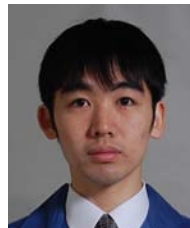
参考文献

- [1] 小寺 秀俊, “MEMS 分野の研究動向,” Technical Report 1037, NEDO 海外レポート, 2009 .
- [2] 平田晋吾, 小島正人, 大地一嘉, “人工衛星搭載用 TDG-IRU の小型軽量化,” 三菱プレジジョン技報, vol.6, pp.13-16, 2011 .
- [3] K. Maenaka and K. Okamoto, “Analog Integrated Circuit for Micro-Gyro Interface Realized by Multi-chip Service in Japan,” A Publication of Sensors and Micromachines Associated Society, vol.118, no.10, pp.475-482, 1998.
- [4] 岩田 穆, 武部 幹, スイッチトキャパシタ回路, 現代工学社, 1985 .

[執筆者紹介]



番 政広 略歴
2009年入社，主にMEMSセンサ開発に従事。



小林 健二 略歴
2007年入社，主にMEMSジャイロ用回路開発に従事。



柴尾 新路 略歴
2008年入社，主に光通信デバイス開発に従事後MEMSジャイロ用回路開発を担当。



福田 智洋 略歴
2007年入社，主にMEMSジャイロ用回路開発に従事。



内村 明高 略歴
2006年入社，主にMEMSジャイロ開発に従事。



中下 修治 略歴
2010年入社，主にMEMSジャイロ開発に従事。

カメラ撮影パラメータの動的順位変更による 車番認識システムの高速化

谷山 一彦, 林 健太郎

要旨： カメラで車両のナンバープレートを撮影し、画像処理を用いて文字を認識する車番認識システムの高速化に関する報告である。追加に必要なハードウェアは極力少なくし、ナンバープレート画像の輝度計測、時計による昼夜判定、および照度センサによる照度測定を組み合わせ、カメラの撮影パラメータの優先順位を動的に変更することにより高速化の課題を解決した。本方法により認識時間は目標である 0.5 秒以下を達成した。

1 まえがき

1999 年より車番認識システム（車両ナンバープレートの全文字を自動読み取りするシステム）[6]を開発してきた。車番認識システムは、駐車場機器と連動することにより、以下のような利点がある。

- (1) 利用者の駐車券紛失の対策：車番検索により、入場時刻の特定が可能。
- (2) 入出口の渋滞緩和の対策：月極契約車両、事前精算済み車両は車番で自動的にゲートが開く。
- (3) 利用者地域の把握：車番の陸支コード別の利用率を算出可能。

車番認識システムはカメラでナンバープレートを撮影して、デジタル化された画像を取得し、画像処理を行い文字を認識する。この車番認識システムは屋内・屋外の両方に設置することが要求される。屋外では環境照度が大きく変化するために、画像処理を行うために適切な輝度の画像を撮影することは、屋内よりむずかしく、適切な撮影パラメータの調整方法が課題 [1, 2] であった。輝度の適切でない画像では通常より認識に時間を要し、適正な値から大きく外れた場合には認識に失敗する。追加に必要なハードウェアは極力少なくし、ナンバープレート画像の輝度、時計による昼夜判定、および照度センサによる照度測定を組み合わせ、カメラの撮影パラメータの優先順位を動的に変更することにより高速化する方法を考案した。本方法により、認識時間は目標である 0.5 秒以下を達成した。

以下、2 章では車番認識システムの構成を、3 章では屋外設置のための要件を、4 章では撮影パラメータの優先順位を、5 章では評価結果を述べる。

2 車番認識システムの構成

車番認識システムの構成例を図 1 に示す。この車番認識システムは、車両を検知する「光電センサ」、ナンバープレートを撮影し読み取る「カメラ装置」にて構成される。これらを、基本的な駐車場システム（駐車券発行機、全自動精算機、管理計算機 [7]）と駐車場用シリアル通信回線（パーキングバス [8]）にて接続することで、様々なサービスを実現し、1 章で述べた利点を提供する。次の章では、このシステムの屋外設置のための要件について述べる。

3 屋外設置のための要件

屋内駐車場や地下駐車場に車番認識システムが設置されている場合では太陽光が入らず、照明が設置されているため、環境照度がそれほど変化しない。一方屋外に設置されている場合、季節・時刻・天候により、環境照度がゼロに近い状態から 11 万ルクス^{*1}程度まで変化する。環境照度の

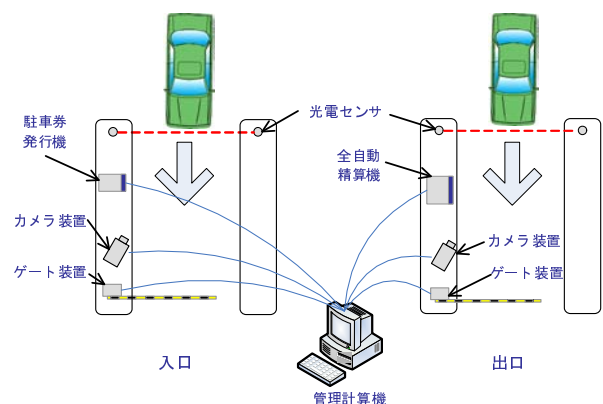


図 1 車番認識システムの構成例

*1 一般家庭室内で 300~400 ルクス、オフィスで 500~700 ルクス程度。

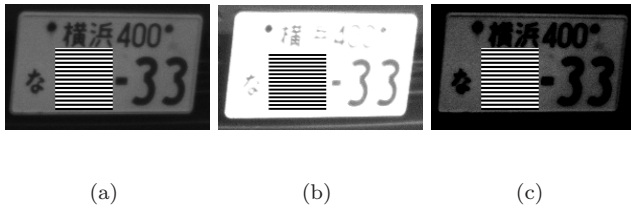


図 2 撮影した画像の例（一部目隠し）

- (a) 標準的な画像
- (b) 「白飛び」した画像
- (c) 「黒つぶれ」した画像

最小は月明かりのない場合の夜間に、最大は夏の快晴の日中に観測され、その変化量は数万倍にも達する。人間の目は巧妙にできていて、この環境照度の差に対してもそれほどの変化量を感じずに物体を見ることができる。一方、人間の作るカメラは専用の高価なカメラを除いて、環境照度に対するダイナミックレンジが十分に広くないため、適切な輝度の画像を撮影することは難しい。実際に撮影した画像の例を図 2 に示す。なお使用しているカメラは赤外線カメラであるので、得られる画像は白黒である。カメラの撮影パラメータの調整が適切でないと文字と背景の輝度の差（コントラスト）が十分取れずに、白っぽいまたは黒っぽい画像になり文字が読み取れない。一般的に、白っぽい画像は「白飛び」と、黒っぽい画像は「黒つぶれ」と呼ばれている。

撮影する画像の輝度を適切に調節するための撮影パラメータは 4 種類存在する。

- (1) 露光：光が撮像素子で電荷に変換される時間長を調整する。
- (2) ゲイン：撮像素子で生成された電荷を電圧に変換する倍率を調整する。
- (3) 絞り：カメラ本体に入射する光量を加減する。
- (4) 照明：カメラ付近に設置する照明の光度。

これらの中で「絞り」は、産業用カメラの場合カメラ本体の機能としては用意されず、追加部品となる。電子的に調整可能なものはコスト上昇を伴うので、手動で調整する固定式のものを使用した。自動調整の対象となるのは、コストが余りかからない「露光」と「ゲイン」である。ここで、「照明」に関しては調整対象としても良いが、パラメータの数を増やすと、アルゴリズムが複雑になり、開発および評価試験のコストが増大するので、対象とせず照明の光度は固定とした。以下「撮影パラメータ」とは「露光」と「ゲイン」のことを指す。

通常のカメラでは照度に対するダイナミックレンジが十分広くないため、固定の 1 組の撮影パラメータ（露光とゲ

イン）では良好な画像が得られない。そのために、良好な画像を得るために複数のパラメータで撮影を行う。良好な画像とは、ナンバープレートの文字と文字のない部分のコントラストが明確で、画像認識処理を行いやすい画像のことを指す。この複数組の撮影パラメータは、それぞれの組で担当する環境照度があり、全体で全範囲の環境照度をカバーする。コスト上の制約からカメラと画像処理部は、それぞれ一台ずつなので、異なるパラメータで同時に撮影して認識処理を行うことはできない。しかしながら、顧客の要求に応えるため、可能な限り速く認識しなければならない。認識にかかる時間の目標は、仕様として平均 0.5 秒以下とした。

複数画像から高コントラスト画像(HDRI:High Dynamic Range Image) [4, 5] を合成し、合成画像に対して画像認識を実行する方法も一般的には存在するが、主に静止物体の画像または移動物体が除去された静止画像の合成が対象で、本件のような移動しているナンバープレートが対象の場合には応用できない。次の章では、これらの課題を解決するための方法として撮影パラメータの優先順位について述べる。

4 撮影パラメータの優先順位

課題の解決方法として撮影パラメータに優先順位を付け、良い結果が期待できるパラメータの順番で撮影し、画像処理を行うことにする。以降の節で撮影パラメータの優先順位を決定するための 3 種類の方法について解説し、それぞれの長所・短所を挙げ、最後にこれらを組み合わせる方法について述べる。3 種類の方法とは次の方法である。

- (1) 検出したナンバープレートの輝度を使う方法
- (2) 時刻・緯度・経度から日の出・日の入り時刻を計算し昼夜判定を行う方法
- (3) 照度センサで周囲の照度を測定して使う方法

4.1 ナンバープレートの輝度を使う方法

直前に撮影し認識されたナンバープレートの画像から、ナンバープレートの文字のない部分と文字の部分の輝度を抽出する。この輝度が基準となる輝度よりも暗いようであれば、次の撮影では、より明るく撮影できる撮影パラメータを優先して使用する。逆に、輝度が基準よりも明るいようであれば、次の撮影では、より暗く撮影できる撮影パラメータを優先して使用する。

この方法では、このようにして環境照度の変化に撮影パラメータを追従させる。この方法の長所は

- (1) 最終的な文字認識の対象となるナンバープレートの輝度をピンポイントで取得するため精度が高い。

である。後述する照度センサを用いた方法では、大まかな照度しか取得できない。短所は

- (1) 何らかの原因でナンバープレートを見つけれなかった場合輝度が不明となる。
- (2) 車両の進入の時間間隔が環境照度の変化に対して十分短ければ、変化に対しての追従が正しく行えるが、そうでない場合は正しく行えない。
- (3) (2) と関連するが、車両の進入がない時間帯がある場合は正しく追従できない。

となる。短所 (1) の見つけれられないナンバープレートの例を図 3 にイラストで示す。

この例では

- ナンバープレートの文字が隠れるような飾り枠を取り付けている場合
- ナンバープレートの一部に建物などの濃い影がかかった場合

を示している。

短所 (2) の具体例では雲の流れが速く、日向と日陰が煩雑に繰り返される場合がある。短所 (3) に関しては夜間閉店するショッピングセンターなどでは、その日の最初の車両が既に明るくなってしまってから入庫する場合などがある。

4.2 昼夜判定を行う方法

文献 [3] に示されている方法で、装置の設置された緯度・経度と日付がわかれば、分単位の精度で、日の出・日の入り時刻を計算することが可能である。緯度・経度に関しては、定数なので、設置時に何らかの方法で測定し装置に設定すればよい。この緯度・経度の測定は現在販売されている携帯電話・スマートフォンのほとんどに GPS が装備されているので、簡単に行える。次に日付と時刻を知る方法であるが、採用している CPU 内に時計を搭載しているので、これを利用できる。この時計は誤差を持っているが、半年に一回程度正確に合わせれば、誤差は最大でも 5 分以内に抑えられる。緯度・経度と時刻から日の出・日の入り



図 3 見つけれられないナンバープレートの例

- (a) 文字が隠れるような飾り枠を取り付けている
- (b) ナンバープレートの一部に濃い影がかかっている

時刻を求める計算はファームウェアで行われる。

このように後述の短所で述べる点を除外すれば、日の出・日の入り時刻から、昼夜の判定ができるので、撮影パラメータを決定できる。この方法の長所は

- (1) 4.1 節で述べたように、ナンバープレートに依存したり、車両進入の時間間隔が影響することはない。

である。短所は

- (1) 天候の情報がないため、天候の影響が除外できない。
- (2) 地形や建物による影の影響を除外できない。
- (3) 昼夜の判定はできるが、環境照度を数値として得られるわけではない。

となる。

4.3 照度センサの測定値を使用する方法

照度センサの構成を図 4 に示す。

図中のフォトダイオードは赤外線を変換し、変換された電流は電圧に変換され、最終的にデジタル値として、CPU に読み取られる。光を受けるフォトダイオードはレンズ一体型のもを採用している。このレンズにより、車両の進入路の照度に重点を置いて測定するようになっている。

この方法の長所は

- (1) 4.1 節で述べた方法と違い、ナンバープレートに依存したり、車両進入の時間間隔が影響することはない。
- (2) 4.2 節で述べた方法と違い、天候や影の影響も含めて計測できる。

である。短所は

- (1) 4.1 節で述べた方法と違い、ナンバープレートの輝度をピンポイントで測定できない。周辺の照度を測定するので、車両や地面の色の影響を受ける。
- (2) 車両のヘッドライトの影響を受ける。

となる。概して照度センサを使用する方法は 4.1 節で述べた方法より精度が劣る。

4.4 方法の組み合わせ

これまでの 4.1, 4.2, 4.3 節で、適切な撮影パラメータを求める方法について、三通りの方法を示したが、それぞれ

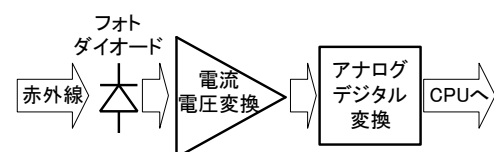


図 4 照度センサの構成

長所・短所が存在する．長所を残して，短所の影響を最小とするために，これら方法を組み合わせて最も速く認識できる構成とするのが本論文の最も重要な部分である．基本の方針としては以下ようになる．

- (1) 精度が良いという点を重要視して，基本的には「ナンバープレートの輝度」を使う方法を用いる．
- (2) 上記方法で対処できないとき，「昼夜判定」と「照度センサ」の方法を用いる．

これら三通りの方法を組み合わせたカメラ制御部の構成を図6に示す．

「ナンバープレートの輝度」，「昼夜判定」，「照度」の三つの情報から撮影パラメータを決定しカメラに送る．これら三つの情報はそれぞれ以下の方法で得る．

- (1) 撮影された画像から画像処理を通してナンバープレートの輝度を得る．
- (2) 時計の日付から，日の出・日入り時刻を計算し昼夜判定する．

- (3) 環境照度を照度センサを通して計測し照度を得る．
- これら三つの情報を得る方法については，それぞれ 4.1, 4.2, 4.3 節で既に詳細を述べた．図6に示されている「撮影パラメータ優先順位の決定」手順を図5に示す．以下この手順について詳説する．

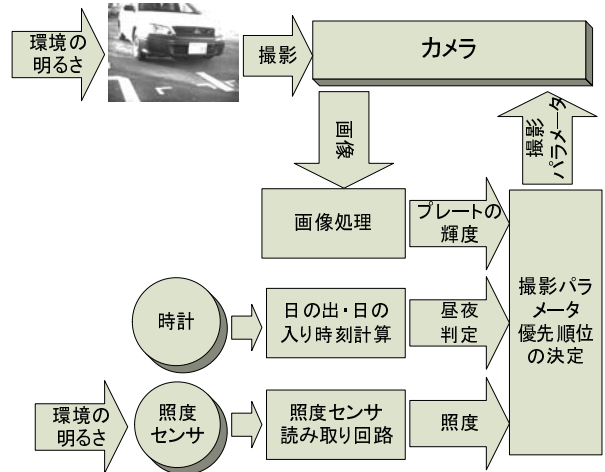


図6 カメラ制御部の構成

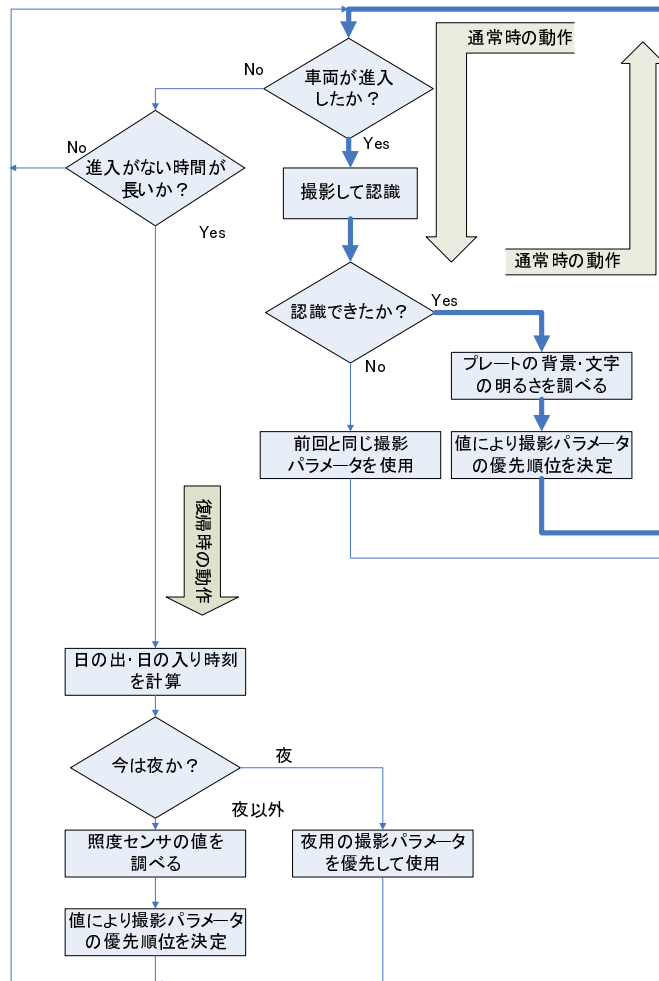


図5 撮影パラメータ優先順位の決定手順

(1) 通常時の動作

通常時の動作では、画像処理によってナンバープレートの位置を特定し、ナンバープレートの文字と背景の輝度を測定する。この二つの輝度には、それぞれに対して上限と下限を設けてある。二つの輝度が両方とも、上限と下限の間に入っていれば、次の車両が進入してきたときは、同じ撮影パラメータを優先させる。どちらかの輝度が下限を下回っていれば、次の車両が進入してきたときは、より明るく撮影できるパラメータを優先する。逆に上限を上回っていれば、より暗く撮影できるパラメータを優先する。これにより、環境照度の変化に対して追従して撮影ができる。この動作は図5において「通常時の動作」として太線で示してある。ほとんどの場合この「通常時の動作」となり、(4)で述べる「復帰時の動作」に至ることは少ない。

(2) 長い時間車両の進入がない場合

通常時の動作は、車両進入の時間間隔が環境照度の変化する時間より短いことを前提としている。長時間車両の進入がない場合、環境照度が大きく変化して、前回のナンバープレートの文字と背景の輝度を参考にできない。このために、前回の車両進入からの「経過時間」を計測し、決められた閾値を超えた場合は、別の処理を実行する。この別の処理は「復帰時の動作」として(4)で後述する。

(3) 認識に失敗した場合

通常動作時において、何らかの理由でナンバープレートの位置を特定できなかった場合は、撮影パラメータの優先順位は変更せず、次の撮影にも同じ撮影パラメータを使用する。なお、このように認識に失敗した場合、車両進入がなかったものとして、(2)で述べた「経過時間」の計測は中断せずに継続する。

(4) 復帰時の動作

車両の進入が一定時間ない場合は復帰の動作となる。最初に、その日の日の出・日の入り時刻と現在時刻を比較して、昼夜を判定する。太陽が出ていないはずの時刻であれば、夜用の撮影パラメータを優先して使用する。この場合、太陽は出ていないので、もし照度センサから明るい計測結果が得られても、それはヘッドライト等の外乱によるものと考えられる。このため照度センサの値は無視する。夜でないと判断されたら、照度センサから得た計測結果を用いて、撮影パラメータの優先順位を決定する。

5 評価結果

5.1 ナンバープレートの輝度を使う方法

実際に動作させた場合の一例として時間経過に対するナンバープレート画像の輝度変化をグラフ化したものを図7に示す。このデータは業務用ナンバープレートを定位置に

固定し、5分間隔で連続撮影し取得した。実験を行った季節は夏で、天候は曇り時々晴れであった。このグラフについて、以下に経過時間に沿って解説する。

- 9時から20分経過後に撮影パラメータ2を優先して撮影が開始している。
- 145分経過時に文字の輝度が上限の閾値を越えたため、撮影パラメータ1が最優先に切り替わった。
- 245分経過時に背景の輝度が下限の閾値より下がったため、撮影パラメータ2が最優先に戻った。
- 490分経過時に背景の輝度が下限の閾値より下がったため、撮影パラメータ3が最優先に切り替わった。

ここで、撮影パラメータ1が明るい環境に対応したパラメータで、撮影パラメータ3は暗い環境に対応している。そして、撮影パラメータ2はその中間である。全体として文字・背景の輝度が0と255近辺で飽和せず、十分に文字と背景のコントラストが取れている。

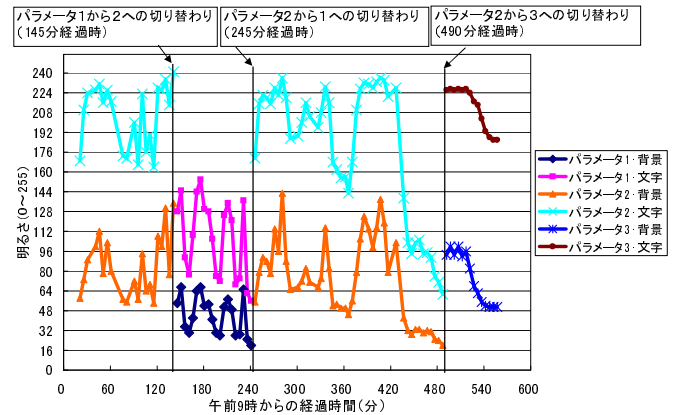


図7 時間経過に対するナンバープレート画像の輝度変化

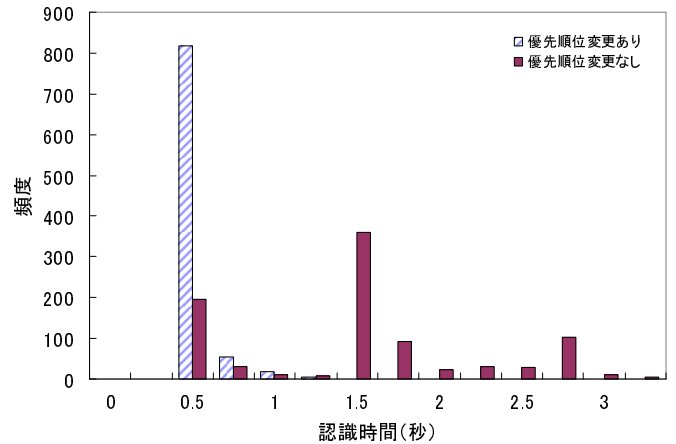


図8 認識時間のヒストグラム(母数=899)

5.2 認識時間短縮の効果

本論文で説明した方法の結果の有意性を示す一例として認識時間の短縮の効果を示す。図 8 の認識時間のヒストグラムに示す。このグラフは 24 時間定点観測を行い、認識可能であった 899 台の車両の認識時間をヒストグラムにしたものである。実験を行った日の季節は春で、天候は晴れであった。このグラフで「優先順位変更あり」とは、ここまで述べた方法を実際に適用し、撮影パラメータの優先順位を動的に変更した場合で、「優先順位変更なし」とは撮影パラメータを使用する順番を固定した場合である。ここで使用したパラメータの数は 3 で、「優先順位変更なし」では暗い・中間・明るい順で撮影している。

「優先順位変更あり」の場合、山は一つでほとんどが 0.5 秒近辺に集約されているのがわかる。それに対して「優先順位変更なし」では 0.5 秒、1.5 秒、2.7 秒近辺に山が三つあり、山それぞれが何回目の撮影で認識に成功したかに当たる。例えば、三つ目の山は 1 回目と 2 回目の撮影で認識に失敗し、3 回目に成功したグループである。「優先順位変更あり」に認識時間短縮の効果があり、当初の目標である平均で 0.5 秒以下を満たしている。「優先順位変更なし」の場合は平均が約 1.5 秒になる。

6 むすび

車番認識システムで使用されているカメラで、画像認識に適した画像を撮影するために、撮影パラメータの優先順位を動的に変更する方法を考案した。この方法では、ナンバープレート画像の輝度計測、時計による昼夜判定、および照度センサの三通りの方法を組み合わせることにより、それぞれの方法の持つ長所をなくさずに、短所による影響を最小限にした。認識時間は当初の目標である平均で 0.5 秒以下を達成した。今後は、実環境で動作させて得られたデータを分析して、アルゴリズム中での判断の閾値等をより最適化する予定である。

参考文献

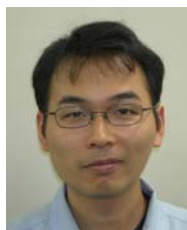
- [1] 米本和也, “CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用,” CQ 出版社, 2008.
- [2] 米本和也ほか, “CCD/CMOS イメージ・センサ活用ハンドブック,” CQ 出版社, 2010.
- [3] 長沢工, “日の出・日の入りの計算,” 地人書館, 1999.
- [4] R.M.Rangayyan, and R.Gordon, “Expanding the dynamic range of x-ray videodensitometry using ordinary image digitizing devices,” Appl.Opt., vol.23, no.18, pp.3117-3120, Sept. 1984.
- [5] 山田啓一, 中野倫明, 山本新, “車載用カメラのダイナミックレンジ拡大方式,” 電子情報通信学会 D-II, Vol.J78, no.10, pp.1439-1449, 1995.
- [6] 館和嘉, 関真規人, “新型車番システム,” 三菱プレジジョン技報, Vol.4, pp.32-36, 2009.
- [7] 遠藤高, 飛松祐介, 前島徹, “駐車場標準管理計算機ソフトウェアの開発,” 三菱プレジジョン技報, Vol.3, pp.11-16, 2008.
- [8] 鈴木暢夫, 浅田志朗, 早川正明, “パーキングバスシステム,” 三菱プレジジョン技報, Vol.1, pp.63-69, 1992.

[執筆者紹介]



谷山 一彦 略歴

2006 年入社, 入社以来画像処理の研究開発に従事し現在に至る。



林 健太郎 略歴

2010 年入社, コンピュータビジョン, 画像処理, 3 次元認識などの研究開発に従事。工学博士。

小規模ロック板式駐車場向け低価格集中精算機の開発

佐々木 秀一，金村 友樹，長峯 光寛，鈴木 秀一

要旨： 小規模ロック板式駐車場に用いる低価格ですぐれた安定性を有する集中精算機を開発した。集中精算機とロック板間の通信ラインの信号電圧の最適化とデータ検証等によりシステムの安定化を図り、構造の簡略化および制御基板の一体化により低価格化を図った。この集中精算機を用い、車室数が最大 30 車室の安定性、信頼性に優れ、当社比で 70 %に低価格化したロック板式駐車場を開発した。

1 まえがき

ロック板を利用した集中精算機は、ゲート方式での設置ができない地形や、道路に面した小規模なスペースで駐車場を運営する場合に使用する。このロック板を利用した駐車場の平均車室数は 14 車室であり、小型で低価格な集中精算機が要望されていた。今回、小規模ロック板式駐車場をターゲットとした安定な動作が可能で低価格な集中精算機を開発した。集中精算機とロック板間の通信は RS-485[1]規格による通信 I/F[2] が一般的であり、通信回線の品質は周囲環境等に左右されないよう安定度を高める必要がある。そこで、本開発では、ロック板との通信 I/F である RS-485 通信ラインの終端処理の適正化により電氣的安定度の確保を図ると共に、ポーリング方式のソフトウェアによるロック板との通信の安定化を図った。また、筐体の小型化、PCA^{*1}の集約化などの工夫により小型化と低価格化を図った。以下、2 章でロック板式駐車場の構成を説明し、3 章で集中精算機の電気安定度の確保、4 章で通信ソフトウェアによる通信の安定度確保、5 章で低価格化、6 章で開発した機器概要を述べる。

2 ロック板式駐車場の構成

図 1 にロック板式駐車場の構成を示す。図中、①はロック板、②は集中精算機、③は出入表示灯、④は集中精算機とロック板との通信線であり RS-485 による渡り配線である。ロック板式駐車場は、駐車を行うと各駐車エリアに設置されているセンサーが感知し、ロック板が上がり車両を動かさないようにする。利用者は集中精算機で駐車エリアの番号を入力し、料金を支払いロック板が下がり出庫することができる。

3 集中精算機の電氣的安定度の確保

3.1 ロック板との集中精算機の結線例

図 2 に集中精算機とロック板との標準的な結線例を示す。図中、A+、B-は RS-485 の通信線であり、集中精算機とロック板は集中精算機がマスター、ロック板がスレーブの関係である。

この構成は、マルチポイント構成で接続された 2 線式 RS-485 回路とも呼ばれ、双方向でのデータ伝送が可能だが、同時には一方向である。RS-485 は、通信業界で最も広範囲に採用されている伝送線規格であり、比較的長い距離での強固なデータ送信が可能である。ロック板は通信ライン上に最大 30 台接続される。ケーブルは 1ペアのツイストシールド線を使用、最長 100m とし集中精算機とロック板の最遠端の 2ヶ所を終端抵抗で終端している。サージプロテクターは RS-485 トランシーバを ESD^{*2}やサージからの保護を目的としたデバイスである。

3.2 終端

終端は、使用される信号ラインのインピーダンスを合わせ、信号の反射による誤動作を防止させるために接続する。信頼度の高い RS-485 通信を実現するためには、伝送線内での反射をできるだけ小さくすることが重要であり、正し

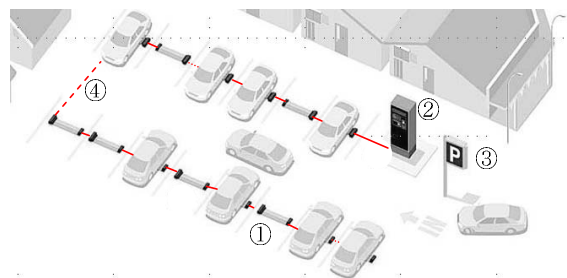


図 1 ロック板式駐車場の構成

*1 PCA : Printed Circuit Assembly プリント回路アセンブリ

*2 ESD : electrostatic discharge 静電気放電

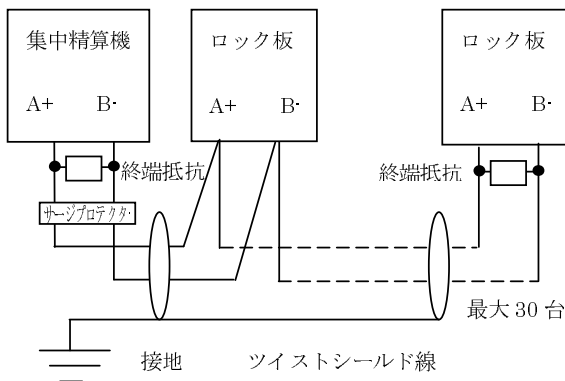


図2 集中精算機とロック板との結線例

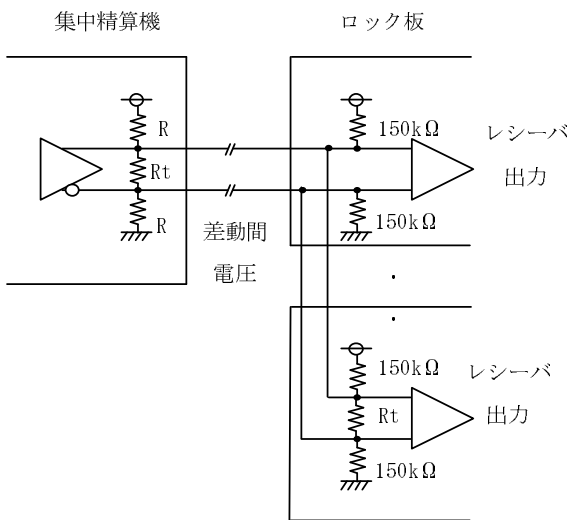


図3 並列終端の回路構成

いケーブル終端を行った場合のみ可能である。ロック板のRS-485の終端方法には、並列終端とAC終端がある。AC終端はケーブルを長くできない欠点もあるが、消費電力とリンギング電圧を抑える効果がある。終端方式の違いはロック板のメーカーや型番により異なっている。開発した集中精算機では、両タイプの終端方式にも対応できる回路を採用した。図3に並列終端の回路構成を示す。図4にAC終端の回路構成を示す。図中、Rtは終端抵抗、Rはフェイルセーフバイアス抵抗、CはAC終端のためのコンデンサである。

3.3 オープン時のフェイルセーフ

バス・アイドル状態では、バスを駆動するデバイスは存在せずレーザー出力は不定となる。このために、UART^{*3}でランダム・データが受信され疑似スタート・ビット、疑似割込み、フレーム・エラーが発生することがあるが、フェイルセーフ電圧を設定することで解決した。図5に差動入力

電圧とレーザー出力状態を示す。図中、縦軸は差動間電圧、横軸は時間を示す。太線は信号”L”，信号”H”，ライン開放状態である。RS-485の電気特性では、ドライバ側の出力電圧が±1.5V，レーザー側の入力レシオールド電圧が±200mVであり，受信側電圧レベルが±200mV以内の場合は不定状態である。(図5斜線部)

3.4 フェイルセーフバイアス抵抗Rの決定

以下の計算式からバイアス抵抗Rを計算し最適な終端とバイアス抵抗を決定した。

$$V_{fsb} = R t / 2 (V_{cc} / (2 R + R t / 2))$$

V_{fsb}: フェイルセーフバイアス電圧

R_t: 終端抵抗

V_{cc}: 駆動電圧

R: フェイルセーフバイアス抵抗

3.5 フェイルセーフバイアス電圧の実測値

図3及び図4と同様の構成を用意し、実運用を想定してドライバとレーザー間には100mのケーブルを挿入し、レ

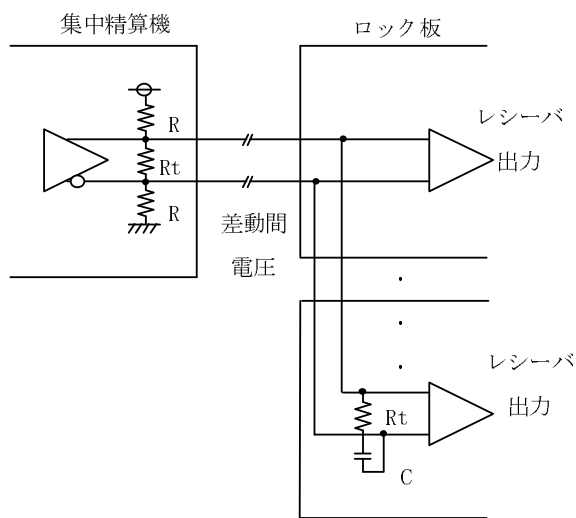


図4 AC終端の回路構成

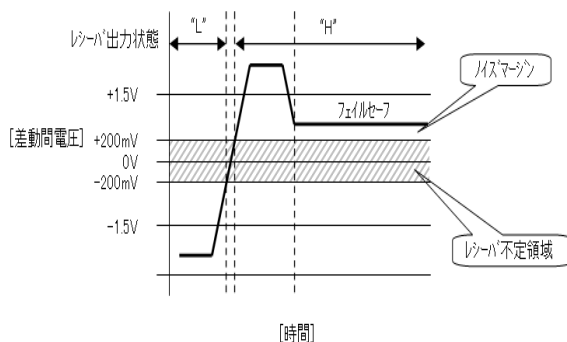


図5 差動入力電圧とレーザー出力状態

^{*3} UART:universal asynchronous receiver transmitter 汎用非同期受信送信機

シーバ側にて測定を行った。表 1 に並列終端，表 2 に AC 終端時の設計値と実測値の対比を示す。並列終端，AC 終端でもフェイルセーフ電圧に対してノイズマージンを確保した。

3.6 過渡過電圧ストレスの保護

誘導雷，電源変動，誘導性スイッチング，静電放電から大きな過渡電圧が発生することにより RS-485 トランシーバが損傷を受けることがある。集中精算機では，ESD 保護，サージ保護を目的としたサージプロテクターを採用し通信回線の保護を図った。

4 通信ソフトウェア

4.1 ロック板通信タスク概略フロー

精算機とロック板との通信は，RS-485 回線上に精算機 1 台，ロック板 N 台の 1 : N で接続されている。通信回線上の競合を回避するために，精算機が指定したロック板のみが送信権利を得て通信を行うポーリング方式の通信制御を行う。精算機は常時，アドレス番号順にロック板とポーリング通信を行い，その応答データに含まれる「車両感知状態」/「ロック板位置状態」を監視し，精算機が意図するロック板状態と一致しなければ，ロック板の上下操作要求を行う。図 6 にロック板通信タスク概略フローを示す。図中「ポーリング送信」では，ロック装置の機種に合った通信速度，データ内容で，RS-485 回線経由で特定のロック装置宛に，ポーリングコマンドを送信する。ポーリング送信後は，図中「応答受信待ち」でロック装置からのポーリング応答データの受信を待つ。応答データを受信した場合は，図中「受信データ保存」で受信データ解析用バッファにデータを保存する。規定された時間だけ待っても正規のデータを受信しなかった場合は，図中「エラー処理」にてエラー回数のカウント，通信異常警報発生時の制御を行う。受信デー

表 1 並列終端の実測値，測定値の対比

ロック板 接続数	設計値 Vf _{sb}	実測値		
		Vf _{sb}	「シフト」H ⁺	「シフト」L ⁺
1 台	0.27V	0.23V	1.81V	-1.72V
5 台	0.27V	0.23V	1.78V	-1.69V
10 台	0.27V	0.23V	1.78V	-1.69V

表 2 AC 終端の実測値，測定値の対比

ロック板 接続数	設計値 Vf _{sb}	実測値		
		Vf _{sb}	「シフト」H ⁺	「シフト」L ⁺
1 台	0.51V	0.52V	2.48V	-2.3V
5 台	0.51V	0.52V	2.4V	-2.26V
10 台	0.51V	0.53V	2.43V	-2.26V

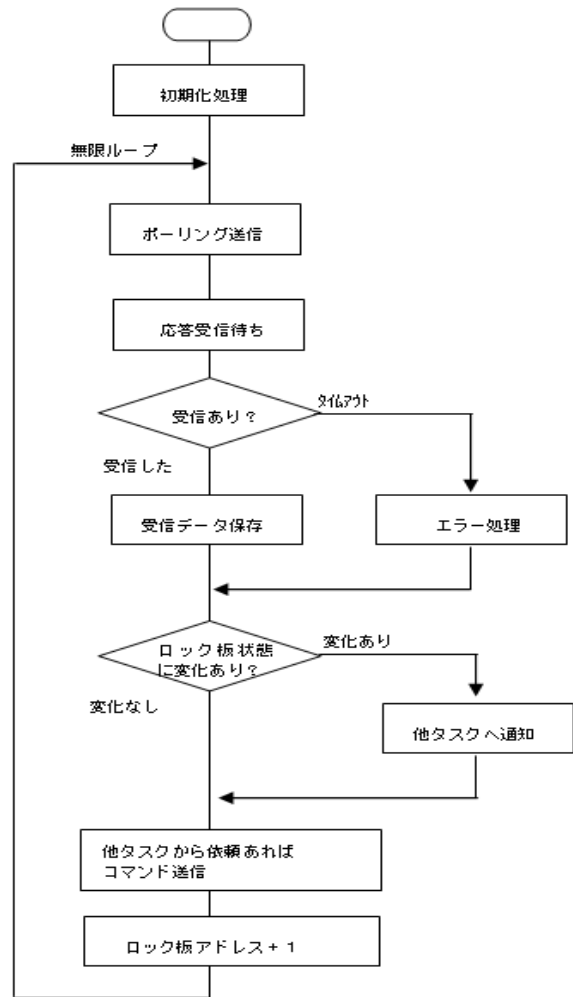


図 6 APS-110 ロック板通信タスク概略フロー

タの解析を行い，前回ポーリング通信時からロック板状態に変化が発生した場合は，図中「他タスクへ通知」にて上位のロック板状態監視タスクに変化発生を通知する。

ポーリング応答データ解析後は，図中「他タスクから依頼があればコマンド送信」にて，上位タスクからのロック板操作要求の有無をチェックして，未送信の要求データがあればここで送信する。

以上がロック板通信タスクが 1 周する際に行う処理で，図中「ロック板アドレス + 1」にて，精算機に登録済の車室データから，番号の若い順で次に来るロック板アドレスを探し，次の宛先アドレスにポーリング送信を行う。

4.2 ロック板操作

1 度に複数のロック板を動作させると電源負荷が高まるため大型の電源を用意する必要があり，電源の小型化を図るため，同時に動作要求があった場合でも 1 台ずつ順番に動作させた。また，ロック板接続台数が多い場合に，毎回 1 番最初のロック板から動作させると，1 番最後にあたるロック板の動作がいつも遅れてしまうため，前回動作させ

た次のロック板からリング状に動作対象を遷移させた。

4.3 通信エラー対策

外来ノイズ等で通信障害によりロック板の応答待ち中に通信不能となった場合、そのロック板は一時的に無視して、次のロック板に動作対象を移行し、通信及びシステム全体が止まってしまうことを防止する。

4.4 データ検証

ロック板との通信は、データ末尾にチェックサムを付加して誤り検出を行う他に、送受信アドレスの比較による検証を行った。集中精算機からロック板へデータを送信する際は、必ず宛先となるロック板のアドレスを指定し、宛先としたロック板からの応答だけを待つことで、通信の信頼性を高めた。リクエストを出したものと違うアドレスからの応答は無視し、次の周期で同ロック板が正しい応答を返せば処理する。

5 低価格化

5.1 構造の簡略化

図 7 に集中精算機の内部配置図を示す。下記 ①～⑦ などの対策により従来機と比較し 30 % 小型軽量化し、加工費を 30 % 原低した。

- ① 専用電源、バッテリーを廃止し小型な汎用電源の採用。
- ② 硬貨ユニットの補助筒無しタイプに限定。
- ③ プリンターをドア側に取り付け、取り付けベース削減。
- ④ ハンドルを前扉に取り付け、筐体内のデッドスペースを削減。
- ⑤ 扉の開閉ハンドルにキーシリンダ破壊対策品を採用し、子扉を削減。
- ⑥ 長蝶番を使用し取り付けスペース削減。
- ⑦ PCA の集約化。

5.2 PCA の集約化

図 8 に開発した PCA 外観を示す。従来機では 3 種類の基板で構成され、それぞれに制御回路とインターフェースがあり制御基板と通信を介し制御されていた。この PCA を 1 枚に集約し部品点数の削減、接続ケーブルの削減により従来比、面積で 50 %、価格で 30 % 原低した。回路の集約化によりロック板との通信負荷が制御基板 CPU 負荷を増加させたが、通信専用 IC を採用することにより、精算時の動作に支障無く制御可能とした。

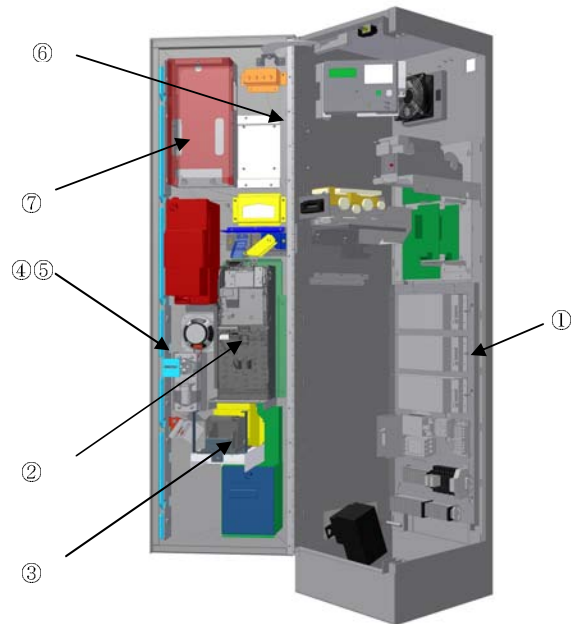


図 7 集中精算機の内部配置図

6 集中精算機機器概要

開発した小型、低価格、高安定な集中精算機 (APS-110) 機器概要を図 9 及び表 3 に示す。

7 むすび

集中精算機とロック板との通信回線では通信方法方式に影響されないノイズマージンを確保した回路構成を開発して安定化を図り、また、車室数を 30 車室以下に制限することで小型し当社比で大きさが 70 % に、さらに価格でも 70 % に低価格化を達成した。ここで開発した集中精算機を製品化 (型名 APS-110) し 2011 年 11 月以降の製品の出荷、運用を開始した。本 APS-110 は、小規模な駐車場市場での受注拡大に繋がることが期待される。

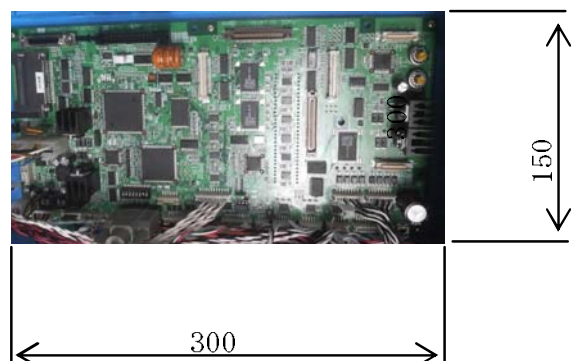


図 8 PCA 外観



1505 (H) * 401 (W) * 440 (D)

図9 外観

表3 仕様概要

項目	仕様	
型名	兼中継器機 APS-110	
形状	屋外自立型(防雨構造)	
材質	本体	鋼板製2.3t
	扉	鋼板製2.3t
表面処理	アクリルウレタン樹脂焼付塗装	
塗装色	本体	シルバー、8分ツヤ(CA-7571)
	前面表示部	グレイッシュパープル
環境条件	温度	-10~40℃ (結露なきこと)
		ヒーター(オプション)装着時は-20~40℃
	湿度	10~90%Rh (結露なきこと)
入力電圧	AC100V±10% 50/60Hz 1φ2W D種接地	
消費電力 (サービス電源時)	ロック板なし	待機時 80VA以下 動作時100VA以下
	ロック板10台	待機時100VA以下 動作時130VA以下(ピーク400VA以下)
	ロック板20台	待機時130VA以下 動作時160VA以下(ピーク700VA以下)
	ロック板30台	待機時150VA以下 動作時180VA以下(ピーク1000VA以下)
	オプション接続時	+100VA
	ヒーター動作時(オプション)	+200VA
接続台数	標準10台 オプション電源追加により最大30台	
質量	130kg以下(オプション除く)	
指定なき公差	JIS B0405-v	

参考文献

- [1] H. Marais, RS-485/RS-422 回路の実装ガイド, Analog Devices, Inc. (June), 2008.
- [2] 鈴木暢夫, 浅田志朗, 早川正明, “パーキングバスシステム,” 三菱プレジジョン技報, vol.1, pp.63-69, 1992.

[執筆者紹介]



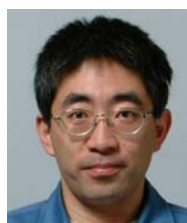
佐々木 秀一 略歴

1984年入社, 各種電気設計に従事.



金村 友樹 略歴

2007年入社, 各種駐車上機器のソフトウェア設計に従事.



長峯 光寛 略歴

1986年入社, 画像処理関連の電気設計を経て駐車場機器の電気設計に従事.



鈴木 秀一 略歴

2010年入社, 駐車場機器, および 発進制御機のソフトウェア開発, プロジェクト管理に従事.

編集後記

三菱プレジジョン技報第7号をお届けいたします。本報では巻頭言にもありますように弊社の不断の取り組みにつき、各技術分野から10件の論文を掲載させていただきました。

これらのうちシミュレータ関連は6件掲載させていただきましたが、船引先生の特別寄稿にもありますようにシミュレータの重要な役割の一つとして、安全性を確保するのが困難な訓練の代替があります。近年、防衛省ではゼロカジュアリティ(死傷者ゼロ)と称し、これを目指して様々な研究がなされておりますが、防衛分野だけでなく様々な分野でゼロカジュアリティを目指してシミュレータの役割は、益々高まっていくものと考えており、弊社がその一端を担えますよう努力を重ねております。

センサ関連開発、近年増加しております超小型衛星関連開発、及び駐車場システム関連開発についても最新情報を掲載いたしました。これらにつきましても弊社における技術開発の不断の取り組みの一端をお伝えできれば幸いです。

今後とも、求められるよりよい製品の提供に向けて技術開発を進めてまいりますとともに、三菱プレジジョン技報を通してそのアクティビティをお伝えしていきたいと存じます。引き続き、弊社をご愛顧いただきますとともにご指導、ご鞭撻賜りますようお願い申し上げます。

三菱プレシジョン技報 Vol.7

©無断転載を禁ず

発行日：2013年4月1日

発行元：三菱プレシジョン株式会社

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：宮崎 正剛

編集責任者：中口 智之

(非売品)

