

三菱プレシジョン技報 2009



表紙写真

東京大学生産技術研究所先進モビリティ研究センター研究用ユニバーサルドライビングシミュレータ。ターンテーブル機構付き6自由度動揺装置と360度全方位映像表示装置で、臨場感の高い仮想運転環境を提供しています。交通シミュレーションとの連携機能により、運転支援システム評価・安全性評価等のITS応用研究や、ドライバ特性解析・ドライバモデル構築に役立っています。当社は、産学官連携のサステイナブルITSプロジェクトに参画し、このシミュレータの開発を担当しました。（参照頁：特別寄稿，論文・P.1）



写真上部：ユニバーサルドライビングシミュレータの全方位窓外視界。

写真下部：ユニバーサルドライビングシミュレータ外観。

底部に設置した6本のシリンダで構成する6自由度動揺装置上に、円盤状のターンテーブルを備えた運転席を載せている。

サステイナブルと三方良し

取締役社長
北山 忠善

平素、三菱プレジジョン株式会社をご愛顧賜り誠に有難うございます。三菱プレジジョン技報第4巻をここに上梓させていただきます。

第4巻では、東京大学生産技術研究所の須田義大教授に“サステイナブル・モビリティ実現に向けてシミュレータへの期待”と題して特別寄稿を頂きシミュレータ小特集を企画しました。サステイナブル(持続可能)という言葉は、世界人口の増加による食糧や鉱物資源の枯渇、地球温暖化ガス増加による気候変動など21世紀に人類が向かい合う課題のキーワードとなっています。人や物の移動(モビリティ)は、世界中で急速に増加しています。今後、モビリティは、輸送関連排出物の増加による健康への影響、温室効果ガスの排出量の増加、衝突事故による死亡・重傷者数の増加、騒音、渋滞の増加などの問題に取り組まなければ持続的に発展することが出来ないと世界経済人会議(WBCSD: World Business Council for Sustainable Development)発行の報告書“Mobility 2030”に述べられています。

ITS(Intelligent Transport Systems: 高度道路交通システム)は、情報通信技術を応用してETCやカーナビゲーションシステムを実用化し快適で安全な自動車の運転支援ツールとして広く受け入れられつつあります。

サステイナブルITSは、さらにシステムとして利用者に受け入れられビジネスとして成立するITS、持続可能な交通社会に貢献するITSの開発を目指して、東京大学の共同研究施設である国際・産学共同研究センター(CCR: Center for Collaborative Research)が中心となって進められた産学連携プロジェクトです。当社もドライビングシミュレータ技術分野で本プロジェクトに参画しました。シミュレータの新たな応用分野が拓かれるものと期待しております。

近江商人が心得として大切にされた“三方良し”という言葉があります。三方良しとは、売り手良し、買手良し、世間良しということです。製品やシステムを開発し売り手から買手に渡るとき双方にメリットが出ることの重要性は当然ですが、さらに買手の向こう側でそのシステムや製品を利用する世間にも喜ばれることが、ビジネスがサステイナブル(持続可能)となる重要な条件であることを言い表しています。本号に御紹介した開発成果や新製品が“三方良し”の精神を踏襲し、サステイナブルとなることを祈っております。お客様におかれましては、本号を御高覧いただきますと共に、今後とも、三菱プレジジョン株式会社のシステムや製品を御愛顧賜りますようお願い申し上げます。

サステイナブル・モビリティ実現に向けてシミュレータへの期待



東京大学教授
須田 義大

地球上に人類が生存しつづけるためには、エネルギーとエコを考慮した新たな仕組みが求められている。居住環境とモビリティ（交通・物流）は両輪であり、現在検討されているモビリティは、街づくりや地方の活性化を目的に発展していく必要が在る。モビリティの基本は人間の歩行である。もともとパーソナルな行動が基本であり、より速く、より楽に移動するための工夫がなされてきた。産業革命により動力が利用できるようになると、馬などの動物を利用することから、交通機械を発明、開発していくことが主体となり、現在の交通システムが実現してきた。最初に実用化したのは、高価な動力機械（蒸気機関）を有効活用することに英知を働かせて実現した、蒸気鉄道である。その後、動力源の変化により、パーソナルな自動車を実現し、また、電気動力を活用するために、電気鉄道も大きく発展した。多くの交通需要を安全に、かつ、信頼性を確保して輸送を行うことから、個別の車両をオーガナイズして運行することが求められた。それを実現したのが、近代的な鉄道であり、自動車交通における ITS（高度道路交通システム）である。

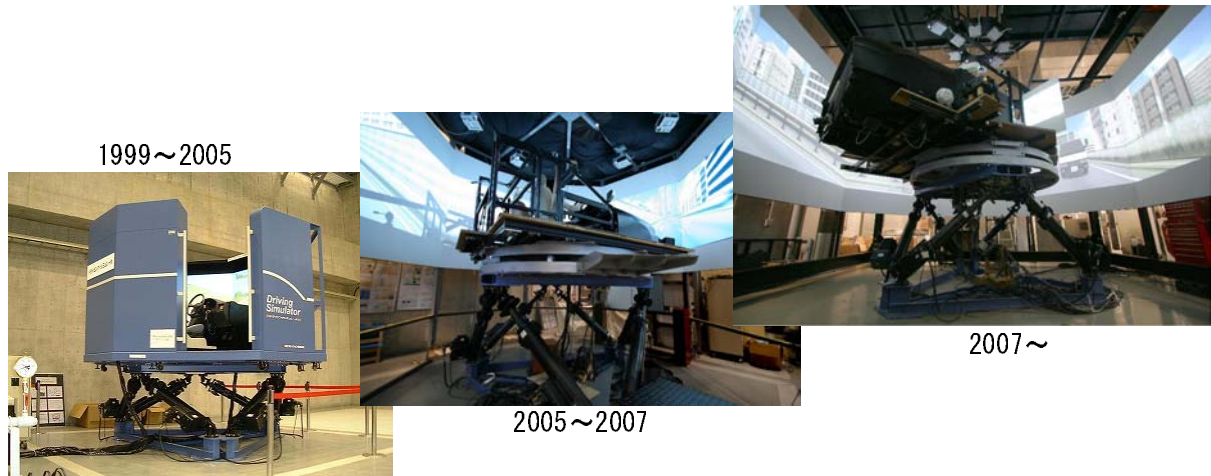
今後のモビリティは、ITS 化された自動車交通と鉄道などの軌道系公共交通システム、さらに、電気動力と人力を活用した進化した自転車（パーソナルモビリティビークル）を適所適材に使い分けて行くところになると考えられる。このようなモビリティ研究のツールとして、筆者がこの 10 年以來着目し、有効活用してきたものが、シミュレータである。1999 年、東京大学生産技術研究所が六本木キャンパスから駒場キャンパスへ移転するタイミングでドライビングシミュレータを導入し、自動車のみならず ITS、交通工学、鉄道車両の乗り心地評価など、様々な用途にシミュレータ

を活用することを試み、また、同時にシミュレータの研究開発も行ってきた。本稿では、これらの経験を基に、シミュレータへの期待と将来展望を考えてみたい。

交通システムにおいては、操縦者（ドライバー）のみならず乗客は交通の主体であり、車両のハードウェア、制御や運行管理などのソフトウェア双方の研究・開発では、物理学的な検討のみならず、人間とのインタフェイスが重要な役割を果たす。車両の構成・構造の検討では運動力学・構造力学による定式化が先ず必要であるが、現実のシステムにおいては、連続体あるいは剛体多体系における非線形な方程式となるため、汎用的な解を求めることは困難である。そのため、コンピュータシミュレーション技術が発展してきたが、人間の行動をモデリングし、忠実に記述することは困難である。人間の行動は環境心理学によって記述することも理解されてきたが、人間の感性や快適性を数式で忠実に記述するには、一層の研究が必要である。

そこに登場するのがシミュレータである。リアルタイムで車両などのハードウェアの運動をシミュレーションし、人間についてはモデルを用いるのではなく、本物の人間が操作し、実際に評価をする。シミュレーションの中に、一部実際の構成部品を組み込んだシミュレーションは、HILS（Hardware in the Loop Simulation）と呼ばれているが、シミュレータは、これに加えて人間（Human）も組み込まれる訳で、いわば、H&HILS というべきコンセプトである。HILS としても、タイヤ試験機との連動を試みており、仮想的なテストコース走行を実現することからバーチャル・ドライビング・グラウンドと呼んでいる。

自動車の研究開発ではドライバー特性は重要であり、また、自動車の安全性向上にはドライバー教育が有効である。



研究室ドライビングシミュレータの変遷

従来ドライビングシミュレータは、このような目的で多用されてきたが、ITS プロジェクトでは、これらに加えて交通工学のツールとしてのドライビングシミュレータの有効性を示してきた。自動車の研究では走行条件を一定にすることが望ましく、ドライビングシミュレータの再現性の良さが利点であった。交通工学における交通円滑化の課題や、ITS における安全支援の有効性を示すためには、実交通環境を模擬できることが重要になる。交通シミュレーションの世界とは、コンセプト、用語、時定数などがドライビングシミュレータの世界とは異なるため、その整合性をとることに努力を払ったが、交通シミュレーションとインタラクティブに連動するドライビングシミュレータを構築し、交通シミュレーションの中に人間が入り込むことに成功した。それにより、複合現実感交通実験スペースとして ITS にかかわる交通問題に取り組むことが可能になった。

一方、自動車の研究においては、実際の自動車の運動挙動の再現性が需要であり、交通工学の研究においても、多くの被験者実験を実現するためには、臨場感の向上は重要である。そのため、モーション装置において、ターンテーブルを導入することによって、ヨーイングの自由度を追加し臨場感向上を実現させた。さらに、音響システムの改良や、映像における様々な工夫、検討を実施してきている。臨場感向上の要求、シミュレータ酔いの防止への要求は着実に高度化しており、そのための秘策を現在も練っているところである。

シミュレータを使った評価手法についても、アンケートのみならず、実際のドライバー行動や車両挙動の計測による手法も行っている。これらの計測結果からドライバーの脇見行動を推定する研究にも有効活用し、現在ではドライ

バーや乗客の生体量を測定することによる評価も実施している。

ドライビングシミュレータの展開についても紹介したい。自動車のカットボディを用いて、ドライバーではなく、後部座席やミニバンにおける 3 列シートの評価などにも大変有効に活用できている。さらに、乗り心地や快適性を評価するという目的では、鉄道車両の動揺再現装置としても有効であり、乗り心地シミュレータ開発や評価手法の検討への活用を示してきている。現在進めているテーマは、自動運転アルゴリズムやエコドライブの評価であり、これらはドライビングシミュレータの新たな使い方を示すものと期待している。また、LRT などの公共交通システムの社会受容性の評価にも適用を検討している。そして、最後に期待しているテーマは、この優秀なツールを、研究のツールだけではなく、ITS における実用マシンに発展させることである。サステナブル・モビリティにシミュレータが必要不可欠な装置になりつつある。

須田 義大(すだ よしひろ)様 プロフィール
東京大学

生産技術研究所	
先進モビリティ研究センター	教授
生産技術研究所 千葉実験所	所長
大学院情報学環	教授(兼任)
国土交通省交通政策審議会	臨時委員
航空・鉄道事故調査委員会	専門委員
財団法人鉄道総合技術研究所	理事
ITS Japan	理事
社団法人自動車技術会	理事・フェロー
社団法人日本機械学会	評議員・フェロー

目 次

巻 頭 言

サステイナブルと三方良し 取締役社長 北山 忠善i
-----------------------------	--------

特別寄稿

サステイナブル・モビリティ実現に向けてシミュレータへの期待 東京大学教授 須田 義大ii
---	---------

論 文

シミュレータ小特集

サステイナブル ITS 応用研究 —東京大学生産技術研究所サステイナブル ITS 共同研究— 大貫 正明1
ドライビングシミュレータにおける後方用映像表示装置の開発 荒木 厚, 伊藤 広明, 矢野 徹8
新型講習用シミュレータDS-300の開発 —新コンセプト教材を搭載した次世代型シミュレータ— 栗田 弦太13
AH-1S 戦闘シミュレータの運用・支援概要 山本 達也, 丸山 英幸19
手術手技訓練用 VR 手術シミュレータの開発 緒方 正人, 菊川 孝明, 寺田 尚史, 本郷 新, 長坂 学, 高波 健太郎23
新型車番認識システム 高木 繁嘉, 舘 和嘉, 関 真規人32
群集の三次元行動計測に基づく滞留検知センサ 関 真規人, 野口 真身, 木村 直哉, 市原 淑雄, 佐々木 秀一, 伊藤 啓二, 鈴木 暢夫37
高速回転ホイールの性能向上 谷口 典史, 田邊 和久, 梶田 直希, 田島 崇男43
MEMS INS/GPS/VMS 複合システムの開発 —タイトカップリング方式とロバスト制御— 倉金 徹49

製品紹介

新マイパークシリーズ 駐車場料金精算システム AP-390・CT-600・GT-651・TD-39059	データ・インタフェース・ユニット(DIU)62 国際宇宙ステーション 日本実験モジュール「きぼう」搭載
新型車番認識システム 車番認識装置 NR-10060	Technical Data Acquisition equipment(TEDA)63 技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」搭載 技術データ取得装置
鉄道訓練シミュレータ61	

サステイナブル ITS 応用研究

東京大学生産技術研究所サステイナブル ITS 共同研究

大貫 正明

要旨： 2003 年度から東京大学生産技術研究所殿とサステイナブル ITS に関する共同研究を行った。本研究では、広域な道路交通の渋滞等を模擬できる交通流シミュレーション（トラフィックシミュレータ）とドライバ特性の研究に用いられている研究用ドライビングシミュレータとの接続を行い、今までにない ITS 開発のための実験環境（複合現実感交通実験スペース）を実現した。この中で、研究用ドライビングシミュレータに対しては、ドライバ特性データの精度を高める観点から、ドライバに対する視認性向上や臨場感向上が求められた。本論文では、これらの課題解決に向けての当社の取り組みについて述べる。

1 まえがき

研究用ドライビングシミュレータは、実験室内で CG (Computer Graphics) を駆使して仮想的な道路環境を作り、視覚、聴覚、体感によってドライバに車を運転している感覚を与えて、各種の実験データを取得できる実験装置である [1, 2]。実際に、自動車関連メーカー及び大学等の研究機関において、研究用ドライビングシミュレータを用いたドライバ特性の研究や、予防安全技術開発などの研究が進められており、実車両実験を行う前の基礎的なデータ取得に貢献している [3, 4]。

2001 年に施行された高度情報通信ネットワーク社会形成基本法 (IT 基本法) において、ITS(Intelligent Transport Systems) 「最先端の情報通信技術 (IT) を活用し人と道路とクルマとを一体として構築することによって、交通事故や渋滞など道路交通問題の解決等幅広い社会経済効果が期待されるシステム」[5] が IT 国家戦略として位置づけられ、具体的施策として推進されたことにより、自動車会社を始め、各研究機関、大学等が積極的に ITS の研究に取り組み始めた。

2003 年には、東京大学生産技術研究所及び国際・産学共同研究センター（現在は東京大学生産技術研究所先進モビリティ研究センター：ITS センター）が中心となり、ITS 技術の開発のみならず都市・交通工学、電子・情報工学、機械・制御工学など諸分野の融合をベースとした ITS 産業の持続的な発展を目的とする産学官連携のサステイナブル ITS(sITS) プロジェクト [6] が開始された。当社も 2003 年度から 2008 年度にかけて本プロジェクトに参画した。

本稿では、サステイナブル ITS プロジェクトにおいて当社が関った研究用ドライビングシミュレータの技術開発の過程及び ITS 開発のために必要な視認性向上及び臨場感向

上への取り組みについて述べる。

2 sITS プロジェクトの取り組み

本プロジェクトでは、図 1 に示すような 3 階層の取り組みで開発が進められた [7]。

「第 1 層複合現実感交通実験スペース」は、2003 年度の文献調査、必要機能抽出、システム構築を経て、2004 年度にプログラム開発及びハードウェアを製作し、一連のシステムとして完成させた。

「第 2 層ヒューマンファクター基礎研究」においては、2004 年度に実車両を用いたデータ取得実験を行い、2005 年度には、そのデータ解析とこれに基づく複合現実感交通実験スペースへの反映を実施した。

「第 3 層 ITS 応用研究」は、2006 年度から 2008 年度の 3 年間行われ、複合現実感交通実験スペースを用いた様々な ITS 応用研究を行い、現在に至っている。

「第 1 層複合現実感交通実験スペース」とは、図 2 に示すとおり広域な道路交通状況をシミュレーションする「トラフィックシミュレータ」とドライバ特性等を計測できる「ドライビングシミュレータ」を接続することにより、ドラ

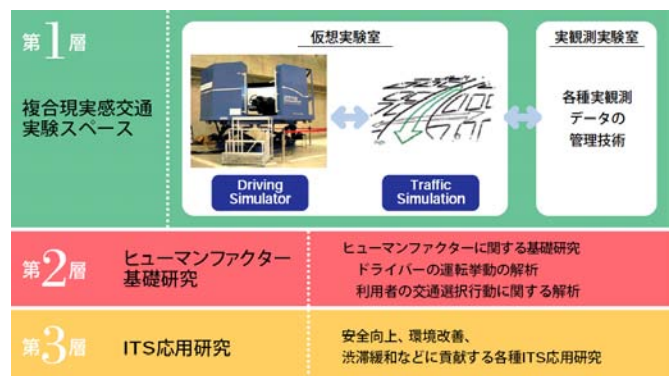


図 1 sITS プロジェクトの取り組み

イバの行動が交通全体に及ぼす影響を研究できる実験装置である。2つのシミュレータでは実行時の処理時間に違いがあるため、お互いの交通関連データを直接やり取りすることが困難であり、それぞれのデータを補間する接続システム（KAKUMO）を介す構造となっている [8]。

一方、ドライビングシミュレータをITS応用研究に活用するためにはドライバへの体感及び視覚情報が重要であり、これに対応して図3に示すような研究用ユニバーサルドライビングシミュレータを構築した。体感に関しては、6自由度の運動が可能な動揺装置にターンテーブル機構を付加することでリアルな体感を実現する駆動装置を組み込み、市街地走行時の右左折や高速走行時の車線変更時におけるドライバのシミュレータ酔いの軽減及び運転のしやすさの向上を図った。視覚情報に関しては、8台のプロジェクタを使った全方位映像と左右2台のプロジェクタによるサイドミラー用映像を設け、交通状況や道路環境に関し、実車両運転時に近い情報をドライバに提供できるシステムとした。また、映像そのものにおいても従来のCGを表示するシステムとは別に、ビルなどの遠景映像はビデオ画像とし、ドライバの運転行動に直接影響を与える信号機、交通車両、道路などの近景映像はCGで生成して、それらをリアルタイムに合成する新しい映像システムを構築することでリアリティ性の向上を図った [9]。

第2層「ヒューマンファクター基礎研究」では、首都高3号線を実験対象区間として実車両実験とドライビングシミュレータの比較実験を行い、シミュレーションに必要な基礎データを取得するとともに模擬精度の検証を行った。

検証では、首都高3号線の実車両実験で計測した高樹町と霞ヶ関付近のトラフィックカウンター（5分間に通過した交通車両台数を計測する装置）の実データと複合現実感交通実験スペースで模擬したシミュレーションデータとを比較した。その結果、良い一致が見られ、シミュレーションモデルの妥当性が実証された [10]。

「第3層ITS応用研究」では、複合現実感交通実験スペースを活用し、各種実験を行った。主要な項目を以下で紹介する。

① 「路上駐車場所の安全性評価実験」

交通量が少ない道路上に駐車帯を設けて物流車両の駐車場所に利用するなど道路を有効活用する施策に関し、同措置がドライバの運転行動へ与える影響や安全性について実験を行った。その結果、路上に明示的な駐車帯を確保することで、交通に大きな影響を与えることなく駐車場所を確保できる結果となり、今後の社会実験を行う上での基礎データとなった [11]。

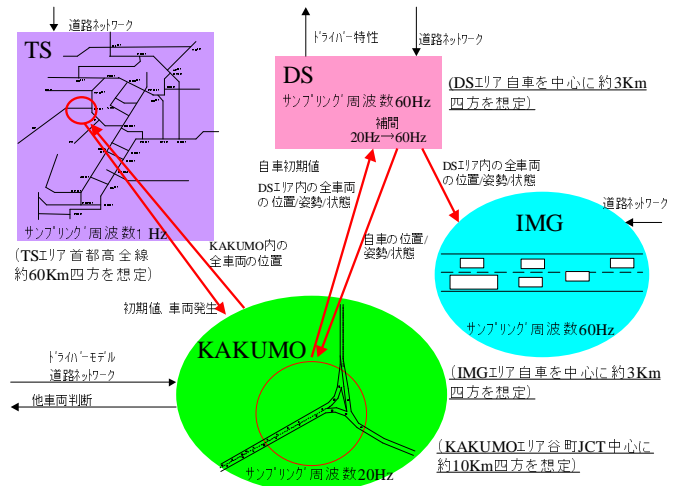


図2 KAKUMOモデル概念図

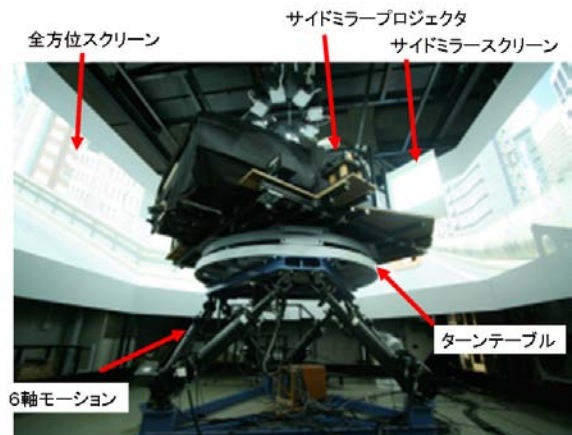


図3 ユニバーサルドライビングシミュレータ

② 「ジレンマゾーン走行中のドライバ挙動」

ジレンマゾーンとは、交差点で黄色信号に直面したとき、ドライバが停止又は通過の判断に迷う領域をいい、この領域におけるドライバ挙動について実験を行った。停止及び通過の判断要因分析、停止挙動解析などの結果としてドライバ特性に関し、今後の信号制御等への活用が期待できる有用なデータベースを構築することができた [12, 13]。

3 ドライビングシミュレータの性能向上

上記のITS応用実験を推進するにあたり、第1層で構築した複合現実感交通実験スペースの性能向上 [14, 15] が必要となり、ドライビングシミュレータに関しては、(1) 視認性の向上、(2) 運転操作感覚の向上、(3) 臨場感の向上、(4) 予防安全システム効果の評価手段付加が求められた。以下、これらの性能向上の詳細について報告する。

(1) 視認性向上(ターゲットプロジェクタ方式)

視認性向上を図るために重要な要素としてスクリーン上に表示される映像の分解能がある。分解能はプロジェクタの解像度と映像を表示する表示エリアの視野角で決まる。分解能が大きいと映像が粗く表示され、遠くの信号、情報板などの文字が見えないことになる。映像の見え方は、分解能に大きく依存する。ユニバーサルドライビングシミュレータの映像システムでは、8台の解像度 XGA(1024 × 768) のプロジェクタで全周囲映像を表示しているため、1台が水平45度の視野角(FOV:Field of View)に約150インチの映像を表示している。このときの分解能は5.3分となる。

今回の実験では120m先の情報板や信号機が明瞭に視認できることを目安としているが、このためには2.5分以下の分解能が必要である。これを実現するためにはQXGA(2048 × 1548)級のプロジェクタが必要となり、大幅な価格増を招くため、プロジェクタの解像度はXGAのまま、人間の目の特性を利用した解決策を実施した。人間の視野は図4に示すように、視線を中心に20度の範囲で物の形の細部にわたる判別や色の識別が可能な中心視野と、中心視野から外れた左右120度の範囲で物の形ははっきりと見えず色の識別も劣る周辺視野の二つで構成される。したがって、信号機、情報板の視認性の向上はこの中心視野角に対応する部分の分解能を上げればよいこととなる。

映像上で信号機や情報板はドライバーの進行方向にあり、正面映像の中心部分が中心視野に対応する部分となる。そこで、図5に示すように150インチの通常の映像表示の中に、中心視野に対応する部分として約70インチの映像を別プロジェクタで投影する方法(ターゲットプロジェクタ方式)を構築した。ターゲットプロジェクタは45度の半分の視野角をXGAで表示するため、分解能として2.3分を得ることができる。実際のドライビングシミュレータにおけるプロジェクタ配置を図6に示す。

今後、分解能と視認距離の詳細な相関に関して、被験者実験を行い、同方式の有効性を評価していく予定である。

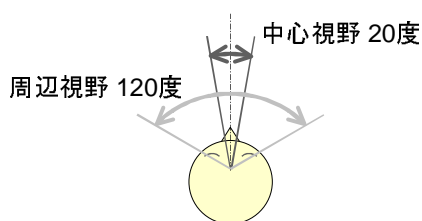


図4 中心視野と周辺視野

(2) 運転操作感覚の向上(ターンテーブルの回転中心最適化と視野角変化対応型映像表示技術の確立)

実車両が交差点などで右左折する際には、交差点内の円軌跡上を車両全体が移動する動き(公転)と車両自身に回転中心を持ち、車両自体が回転する動き(自転)が進行する。この際自転の回転中心が後輪車軸中心付近に位置することが、シミュレーションの結果として明らかとなった。

一方、本シミュレータでは、交差点右左折及び高速走行時の車線変更シーンにおいて、ドライバーの操舵に合わせてターンテーブル機構が大きく回転することで上記の動きを模擬する。第1層で構築した複合現実感交通実験スペースにおいては、ターンテーブルの回転中心がドライバー席の位置に設定されていた。しかし、アンケート調査を重ねる中で、実車運転歴の長いドライバーからは「右左折時等に後輪が滑っている感覚を受ける」との意見が出され、より実車に近い運転操作感覚の模擬を目的として、実車両と同様に後輪車軸中心相当位置にターンテーブルの回転中心を一致させるよう運転席キャビンを移動させた。

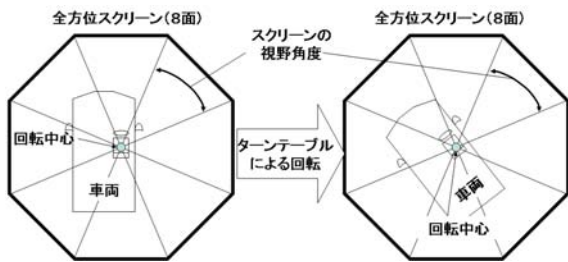
また、これに伴い、視野角変化に対応した映像表示技術の開発も実施した。ターンテーブルの回転中心とドライバー席の位置が一致している場合は図7(a)のように全方位スクリーンの中心がドライバー中心となることから、各スクリー



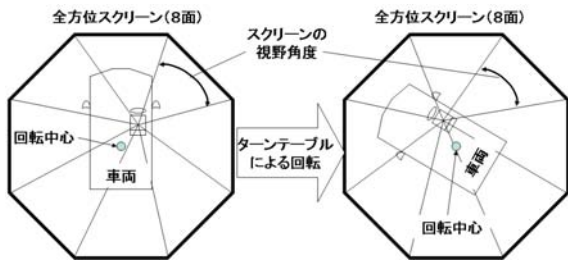
図5 ターゲットプロジェクタ動作時の前方映像



図6 ターゲットプロジェクタ配置図



(a) ドライバがターンテーブル中心の場合

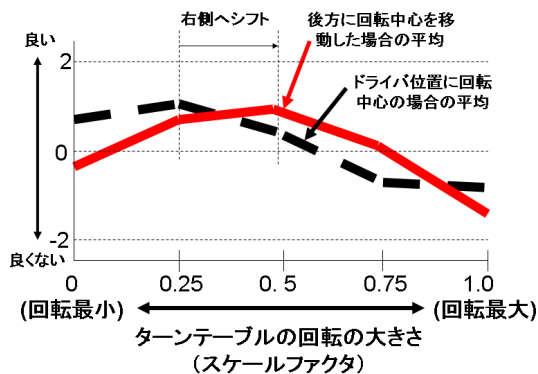


(b) 車両車軸付近がターンテーブル中心の場合

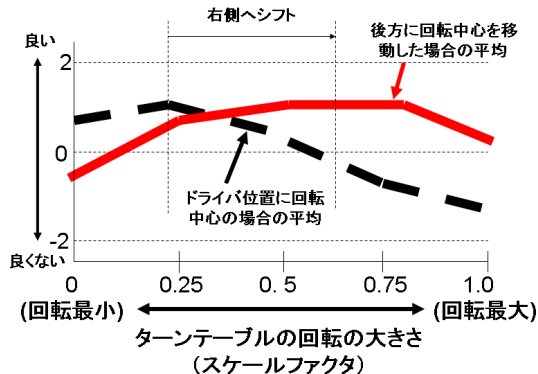
図7 回転中心移動による効果の実験

の視野角度はターンテーブルの回転に係わらず一定となるが、図7(b)に示すようにターンテーブルの回転中心とドライバ席の位置が異なる場合は各スクリーンとドライバ視点位置がターンテーブルの回転に依存して変化するため視野角が変化する。これを解決するため、ターンテーブルの回転角度情報に基づき各スクリーンの視野角度をリアルタイムに計算し、この結果をフィードバックして映像表示を行う技術を確立した。

上記改良を加えたドライビングシミュレータを活用し、運転操作感覚に関する評価試験を実施した。図8(a)、図8(b)に実験結果を示す。横軸にターンテーブルの回転の大きさをとり、縦軸に相対評価結果をプロットした。ターンテーブルの回転の大きさは、目的とする回転角に対し、ターンテーブルが担う回転角の割合で定義される。残りは画像を回転させることで、両方の合計として目標回転角を達成する。図より明らかなように、回転中心を実車と合わせることで、運転操作感覚の最適点がターンテーブルの回転角が大きい方向(0.5付近)へシフトしている。別途実施したシミュレータ酔いに関する評価試験ではターンテーブルの回転の大きさ0.5付近が酔いの軽減に有効であるという結果が得られており、これらの結果から車両挙動と運転感覚とのバランスがより良くなったことが分かる[16]。



(a) 運転操作感覚の主観評価結果



(b) 臨場感主観評価結果

図8 回転中心移動実験による主観評価結果

(3) 臨場感の向上 (音響システム)

ドライバにとって視覚情報、体感に加え、聴覚情報は重要な要素である。実車両の走行音などを再現するのに必要なスピーカ配置について、実車両運転で車室内走行音を収録し、3次元音場シミュレーションシステムを有する無響実験室(室内の壁面で生じる音の反射をなくし残響を抑える実験施設)にて再現実験を行った。本実験施設では、図9に示すように前後左右及び上下に6台のスピーカが配置され録音時の音場を再現する構成となっている[17]。実験結果を図10に示す。図より、6台(6ch)の場合に臨場感が最も高いが、5台(5chU:①, ③~⑥)又は5chD:②, ③~⑥)と4台(4ch:③~⑥)の間には大差が無く、4台と2台(2ch:④, ⑥)では臨場感が大きく異なることがわかる。

上記結果を受けて、4台のスピーカを用いたシステムが採用されたが、ドライビングシミュレータでは、ドライバの水平位置にはスクリーンがあり、視覚情報を重要視することからスピーカを設置できない。そのため、図11に示す指向性の高い音響出力装置を付加して、全周囲のスクリーン8箇所を音波を当ててドライバ位置でほぼ水平に聞こ

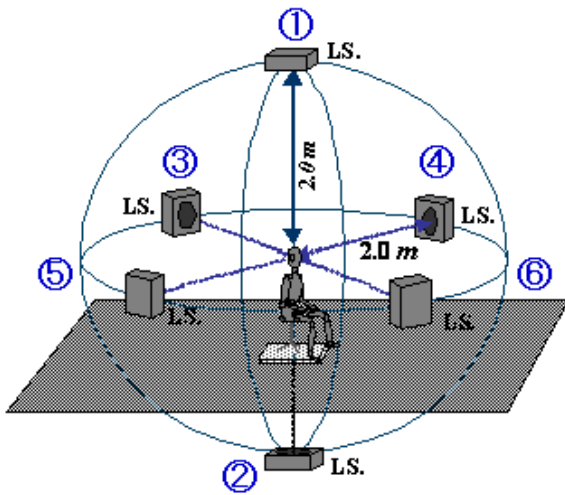


図9 無音響実験室の音場再現施設のスピーカ配置

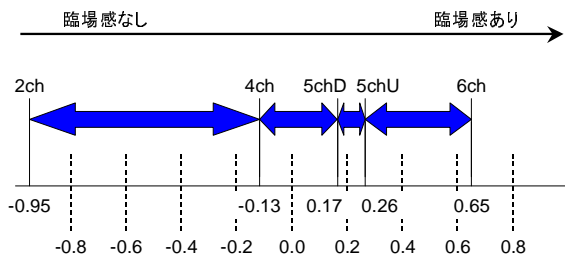


図10 被験者35名での実験結果(臨場感評価の心理尺度値)

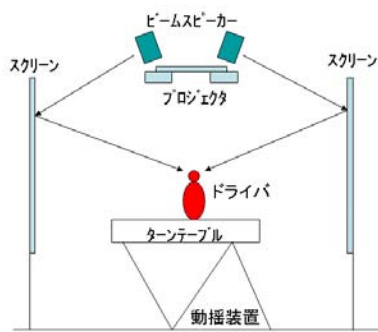


図11 ビームスピーカ原理

えるような音響システムとした。その結果として実車両に近い、走行音、風切り音などに包まれた音場が構成され、臨場感の向上が達成された。

(4) 予防安全システム効果の評価手段付加(カーナビゲーションシステムを応用した予防安全機能)

カーナビゲーション(カーナビ)システムを用いてドライバーに対して情報呈示するシステムが実用化の段階にある。これらは情報通信技術を利用したITSをはじめ、路車協調により安全走行を支援するAHS^{*1}技術となっている。カーナビシステムとの連携によって大きな効果が得られるもの



図12 ドライビングシミュレータに実装したカーナビゲーションシステム

と期待されているが、実車での評価が難しいケースが多く、このような場合はドライビングシミュレータが有効な実験ツールとなる。そこで、これらの検証をドライビングシミュレータ上で行えるよう、図12に示すようにカーナビを実装した。本カーナビには、緯度/経度をシリアル通信で受け取ることができる開発用機材を設置した。

ドライビングシミュレータの映像データベースの中で「首都高速道路4号線」データベースなどは、実在する道路の線形を模擬しているため、自車両(ドライビングシミュレータ)の位置を表す緯度及び経度の情報を計算し、カーナビ用計算機へ逐次送信することで、カーナビの地図と自車両位置を一致させている。また、本カーナビシステムは、任意の地点の緯度・経度情報とそのときの交通情報や注意喚起に関するメッセージを出力するアルゴリズムを有している。

これと道路上に新たな標識や情報案内板、情報提供装置などを組み入れたシナリオを同期させることで、道路インフラと音声案内システムを統合的に実験・評価することが可能である。

更に、高速道路などにおける先行車両との追従走行時の自車両と先行車両の車間距離及び相対速度から求められるTTC(Time To Collision)がある値(閾値)より小さくなると危険な領域に他車両が接近したとして、警報音で知らせるアルゴリズムを有している、これらのアルゴリズムは任意に変更でき、ITSプロジェクトで開発した交通流シミュレーションシステムKAKUMOと接続することで警報システムとしてドライバーへ呈示したときの運転挙動を測定することができ、事故の予防安全や運転支援の効果を評価することが可能である。本システムは今後大いに活用されると期待されており、各種の実験が計画されている。

*1 AHS: Advanced Cruise-Assist Highway Systems

4 むすび

本稿では、6年間に渡って東京大学生産技術研究所殿と共同研究を行い、研究用ドライビングシミュレータの視認性向上及び臨場感の向上を図った内容について述べた。本研究は、東京大学生産技術研究所の土木、機械、電気といった専門領域の各先生方の分野融合や産官学の協力・国際協調を行った成果の一部であり、今後更なる協力関係を築き、効果的な実験装置の研究開発を行っていきたい。

謝辞

本稿の内容は東京大学生産技術研究所先進モビリティ連携研究センターサステナブルITSプロジェクトの「サステナブルITSの展開研究」の一環として行われました。特に東京大学生産技術研究所先進モビリティ研究センター須田義大先生に深く御礼申し上げます。また一部は東京大学生産技術研究所殿が国土交通省国土技術政策総合研究所からの受託研究「ITS新サービスの普及に向けた統合交通シミュレータの活用に関する先端的研究」として研究された内容であり、関係各位に深謝申し上げます。

参考文献

- [1] M. Akamatsu, M. Onuki, Trends in Technologies for Representing the Real World in Driving Simulator Environments, Review of Automotive Engineering, 29,(2008),611-618
- [2] 伊藤宏明・神埜浩・練尾正美, ドライビングシミュレータの映像・シナリオシステムの展開と応用, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.36-08, (2008), 17-22.
- [3] 赤松幹之・大貫正明, ドライビングシミュレータにおけるリアルワールド再現技術の最新動向, 自動車技術, Vol. 61, No.7, (2007), 78-84.
- [4] 早川義彰・荒木厚・大貫正明・練尾正美, 自動車用シミュレータの現状と動向, 自動車技術会学術講演会前刷集, 20025285, (2002), 1-4.
- [5] 国土技術政策総合研究所「ITS:高度道路交通システム」http://www.nilim.go.jp/japanese/its/0frame/index_b.htm, 2009.4.2, accessed.
- [6] 池内克史・桑原雅夫・須田義大・田中敏久・Edward-Chung・SteffanNordmark 他, 産官学連携サステナブルITSプロジェクト, 第2回ITSシンポジウム2003 講演論文集, p.447-452(2003)

- [7] 池内克史・桑原雅夫・須田義大・田中敏久・鈴木高宏・田中伸治・山口大助・小野晋太郎, サステナブルITSの展開, 第6回ITSシンポジウム2007 予稿集, (2007), CD-ROM.
- [8] T. Shiraishi et al., Development of a Microscopic Traffic Simulation Model for Interactive Traffic Environment, Proceedings of the 11th World Congress on ITS Nagoya Aichi 2004, 3446 (2004)
- [9] S. Ono, K. Ogawara, M. Kagesawa, H. Kawasaki, M. Onuki, K. Honda, K. Ikeuchi "Development of Photo-Realistic and Interactive Driving View Generator by Synthesizing Real Image and Artificial Geometry Model" International Journal of ITS Research, Vol. 3, No. 1, pp. 19-27, Nov. 2005
- [10] Y. Suda, SE. Shladover, Y. Takahashi, M. Onuki, K. Matsushita, M. Kanoh, K. Honda, T. Shiraishi "Validation of the universal Driving simulator with interactive traffic simulation." DSC Asia/Pacific 2006-Tsukuba-May/June 2006
- [11] 田中伸治・桑原雅夫, 複合現実感交通実験スペースを用いた路上駐車場所の安全性評価, Vol.59, No.3, 生産研究 (2007), 176-179
- [12] 織田利彦・田中伸治・須田義大・山口大助, ドライビングシミュレータを用いたジレンマゾーン走行時におけるドライバーの停止挙動分析, 電気学会交通・電気鉄道合同研究会予稿集, (2006).
- [13] Toshihiko Oda, Yoshihiro Suda, Shinji Tanaka, and Daisuke Yamaguchi, Evaluation of Stopping Behavior of Drivers in Dilemma Zone Using Driving Simulator, International Journal of ITS Research, Vol.5, No.1, (2007), 47-54.
- [14] 山口大助・須田義大・大貫正明・織田利彦・石川裕記・小田崇徳, ユニバーサルドライビングシミュレータの臨場感向上の取り組み, Vol.60, No.4, 生産研究 (2008), 374-378.
- [15] 竹原昭一郎・松下晃介・深田修・下山修・須田義大, 自動車の操舵特性を考慮したドライバー行動解析, 日本機械学会第16回交通・物流部門大会講演論文集, (2007), 283-286.
- [16] 大貫正明・須田義大・山口大助, 車両旋回時の自転運動の大きさとドライバー評価 - ドライビングシミュレータによる分析 -, Vol.60, No.4, 生産研究 (2008), 83-84.

- [17] 東京大学生産技術研究所，応用音響工学／環境音響学，坂本研究室ホームページ「音場シミュレーション」http://www.acoust.iis.u-tokyo.ac.jp/research/index_j.html，2009.4.2, accessed.

【執筆者紹介】



大貫 正明 略歴

1986年入社，各種シミュレータのシステム設計に従事．東京大学生産技術研究所先進モビリティ連携研究センター研究員として6年従事，現在，シミュレーションシステム第二部研究システム課

ドライビングシミュレータにおける後方用映像表示装置の開発

荒木 厚, 伊藤 広明, 矢野 徹

要旨：合流や車線変更時の後方確認は重要な動作であり，ドライビングシミュレータにおいてもルームミラーやドアミラーを用いた後方確認を模擬する映像表示が重要な構成要素となっている．後方用映像表示装置には幾つかの実現方法があるが，本報では，現実感の向上を目的として新規に開発した，偏光フィルターを用いた後方スクリーン方式並びに，後方スクリーンへのピクチャーインピクチャー表示方式を紹介する．

1 まえがき

ドライビングシミュレータは，図1に示すように，車両運動や交通環境をシミュレーションする制御計算機，シミュレーション結果に従ってドライバーに視覚情報を与える映像発生装置と映像表示装置，音情報を与える音響発生装置，および必要に応じて付加されるドライバーに体感を与えるための動揺装置/制御装置で構成されている．

ドライバーが実車両を運転する際に外から得られる情報としては視覚情報が最も多く，現実感を模擬するドライビングシミュレータにおいても，視覚情報の呈示を担う映像発生装置と映像表示装置の機能がキーポイントとなる．

ドライバーは通常運転する時には前方を向いて走行するため，ドライビングシミュレータにおける前方視界表示が重要であることは言うまでもないが，合流，車線変更の際に行う後方状況確認も重要な動作であり，ドアミラーやルームミラーによる後方視界を模擬する映像表示技術も重要な位置づけにある．

後方視界模擬を実現するにあたっては，下記の2点が課題となる．

- ① ルームミラー及びドアミラーを使用する場合に生ずる視野範囲の重なりを模擬する方法（運転席とスクリーンの相対位置が一定である場合）
- ② ターンテーブル等動揺装置を有するドライビングシミュレータの後方用映像表示方法（運転席とスクリーンの相対位置が変化する場合）

今回，従来的後方映像表示技術に新規な発想を加え，上記課題を解決し，現実感の高い後方映像表示技術を実現した．本報ではその成果について報告する．

2 従来の後方視界表示装置と課題

実車両運転時において，ドアミラー並びにルームミラーを通して見た場合の視野を図2に示す．図よりわかるようにミラーを通して後方を見た際には，ドライバー視点に加

え，各ミラーの奥に仮想視点を置いた状況となる．図2においては，ドライバーの視点を E_D ，左ドアミラーの仮想視点を E_L ，右ドアミラーの仮想視点を E_R ，ルームミラーの仮想視点を E_C と表記した．一般に，左右のドアミラーの視野角は 20° 以上，ルームミラーは 30° 以上あるものが多い．各ミラーを通して見る後方視界映像で重要なポイントを整理すると次のとおりとなる

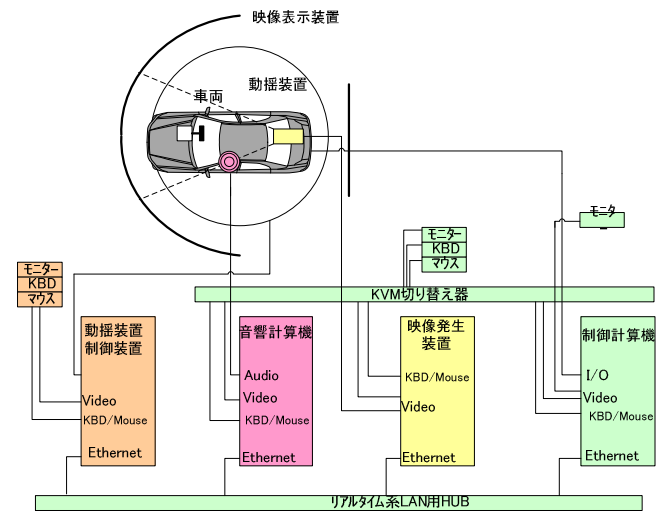


図1 ドライビングシミュレータのブロック図

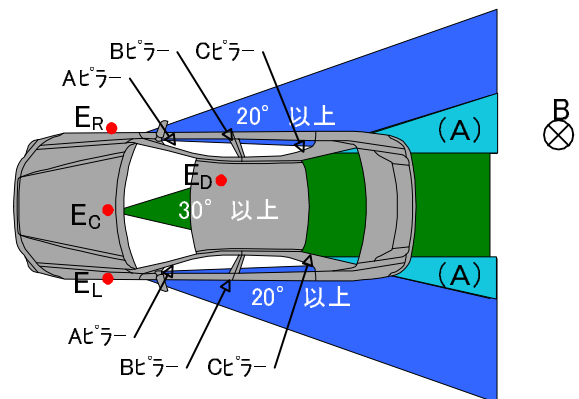


図2 リアミラーの視野角



(a) ルームミラー

(b) ドアミラー

図3 ミラーの見え方



(a) ピクチャーインピクチャー方式



(b) 液晶モニター方式

図4 後方用映像表示装置実現例

- ① 左右のドアミラーの視野角とルームミラーの視野角がCピラーを挟んで一部重なり合っている(図2中(A)の区間)。すなわち、同じ景観を2つの異なる視点から見た画像が存在することになる。例として、図2でB地点に立つ人をルームミラーで見た写真を図3(a)に、同じ場所に立つ人をドアミラーで見た写真を図3(b)に示した。図3(a)では人はCピラーの内側に立って見えるが、図3(b)ではCピラーの外側に立って見える。実車両においては当然の事象であるが、ドライビングシミュレータのスクリーン上に、これを模擬しようとする際には後述するように、工夫を要するポイントとなる。
- ② 各ドアミラーの視野角は通常ボディより若干内側に入り込んでいる。これは、ドライバーが運転する時にルームミラーの一部にボディを映している事を示し、他車との位置関係、車線に対する相対角度の把握に有効に働いている。ドライビングシミュレータにおいても、この車体映りこみを模擬する必要がある

ドライビングシミュレータにおいて後方視界を模擬する方法は3通りに大別される。

前方ピクチャーインピクチャー方式は、図4(a)に示すように前方用映像表示装置の画面の中に後方用映像を映像処理プログラムではめ込み表示するものである。新たなハードウェアの付加を必要とせず安価であるが、ルームミラーと外部景観が同一スクリーン上にあるため違和感があり、また映像発生装置の能力を分割するため、前方視界表示の映像発生が影響を受ける欠点がある。

液晶モニター方式は、図4(b)に示すように、各ミラー位置に液晶モニターを配置して後方視界を表示するものである。実車両と同様の配置に各ミラーを配置できるが、新規にハードウェアを追加する必要がある事やミラーに映してみろという観点からは、まだ現実感に乏しい事などの欠点がある。

後方スクリーン方式は、後方に専用スクリーンを置き、専用プロジェクタで同スクリーン上に後方視界を表示した上で、実車両のミラーを介して、この後方視界を見るものである。実車両に極めて近い状況が再現され、現実感が高いが、先に述べたように、ルームミラーとドアミラーの視野範囲の重なりに起因した異なる視点位置からの画像が存在するため、これらを同一スクリーン上に表示することは困難となる。このため、各ミラー対応で3枚のスクリーンを設置する等の対策をして後方視界を実現しているが、スクリーン配置の制約からドアミラーへの車体の映り込みが模擬できないなどの欠点がある。

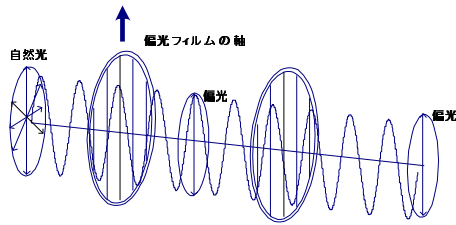
上記の3つの方式は、それぞれ長所短所を持つが、後方にスクリーンを設置し、実車ミラーを使用して、投影した映像を見るという後方スクリーン方式が、実車両の状況に近く、違和感が少ないため、Daimler AG社、Renault社、産業技術総合研究所、NADS(The National Advanced Driving Simulator)など比較的大型のシミュレータでは、この方式が採用されている。

今回、現実感の高い後方スクリーン方式を採用し、偏光フィルムを活用することで、同方式の課題である視野範囲の重なりを模擬を実現した。

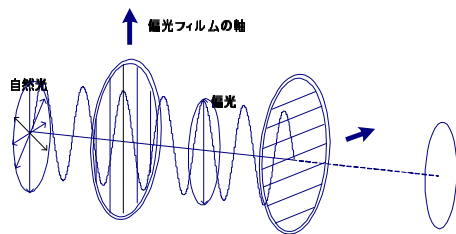
3 視野範囲の重なるの模擬方法（運転席とスクリーンの相対位置が一定である場合）

偏光フィルムについて簡単に説明をする．光は電磁波であるので光を電場の振動と考える．偏光フィルムの透過軸に平行な電場振動成分を X，偏光フィルムの透過軸に垂直な電場振動成分を Y とする．光が偏光フィルムに入射すると電場の X 成分だけが透過し Y 成分は偏光フィルムに吸収され熱に変わる．（図 5(a) 参照．）偏光フィルムを二枚重ね、透過軸を 90° ずらすと X 成分、Y 成分がそれぞれ別の偏光フィルムに吸収されるため理論上光は透過しない．（図 5(b) 参照．）

図 6 に示す試験装置を作り、実際にどの様に見えるか実験を行った．プロジェクタ A、B の前に偏光軸を互いに 90°



(a) 偏光フィルムを平行に配置



(b) 偏光フィルムを直角に配置

図 5 偏光フィルムの仕組み

回転して配置した偏光フィルムを配置し、スクリーンに投影する．やはり偏光軸を 90° 回転するようにした偏光フィルムを貼ったミラーを 2 枚配した．被験者はこの 2 枚のミラーを通してスクリーンを見るようにした．

スクリーンを直接見ると当然図 7(a) のように 2 枚の映像が重なって見える．プロジェクタ A が投影した映像を正面のミラーを通して見た映像の写真を図 7(b) に示し、プロジェクタ B が投影した映像を右のミラーを通して見た映像の写真を図 7(c) に示す．この 2 枚の写真を見てわかるようにミラー側とプロジェクタ側の偏光の透過軸が一致する映像は、はっきりわかるが、それぞれの軸が 90° 異なる映像はほとんど見えなくなっていることがわかる．この実験結果によってドライビングシミュレータへ本方式が適応できることが実証できた．

ドライビングシミュレータとして具現化するには図 8 に示すようにドアミラー用映像表示には偏光軸が水平面に対して平行になるように設置し、ルームミラー用映像表示には偏光軸が水平面に対して垂直になるように設置した．

偏光フィルムを利用した後方用映像表示装置を実際にドライビングシミュレータに適用したところ、互いに干渉する部分の映像がきれいに分離され、各ミラーの視点も全て正規の位置に配置され、眼の焦点距離も実車両と同様であ

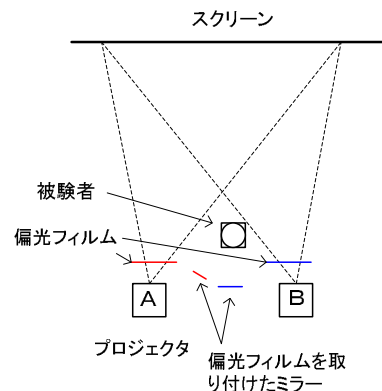


図 6 実験での配置図



(a) スクリーンに映る映像



(b) 正面ミラーに映る映像



(c) 偏光フィルムを直角に配置

図 7 ミラーに映る映像

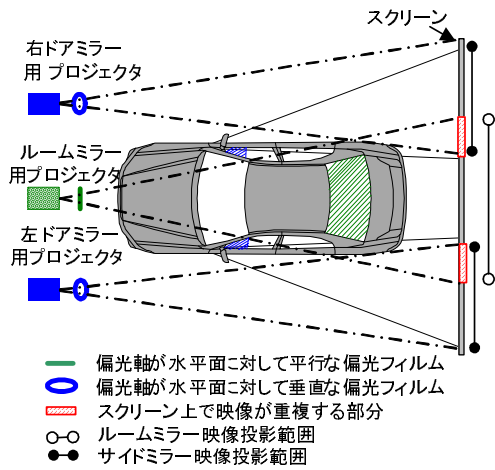


図8 ドライビングシミュレータでの偏光フィルムの配置

り、かつボディもミラーに映り込んでいるため現実感が高くユーザーにも好評である。

4 ターンテーブル等動揺装置を有するドライビングシミュレータの後方用映像表示方法（運転席とスクリーンの相対位置が変化する場合）

ドライバに体感を与えるためにターンテーブルを設けたドライビングシミュレータ [1] が用いられるが、最近では映

像表示装置を全周囲ドームとして固定し、ドーム内にターンテーブルを設けるドライビングシミュレータも出てきている [2]。そのようなドライビングシミュレータでは、プロジェクタが施設またはドームの天井に固定され、車両部がドーム内で回転するため、運転席とスクリーンの相対位置がリアルタイムに変化する。このため、前項で述べた偏光フィルムを利用した後方用映像表示装置を採用することはできない。

そこで、全周囲ドームの後方部分を後方スクリーンに見立て、この部分に各ミラーに対応した後方映像をピクチャーインピクチャー方式ではめ込み、その映像をミラーで見る方法を採用した。ここで問題となるのが、スクリーンが平面でなく球面であることである。球面に映写する際には映像が歪んで見えないように、ドライバーの視点位置に合わせた歪み補正がかけられている。一方、図2で説明したように、ミラーを通して後方を見た際には、ドライバー視点に加え、各ミラーの奥に仮想視点を置いた状況となる。したがってドライバー視点位置に最適化された画像をそのままスクリーンに投影し、ミラーに映して見ると（すなわち仮想視点から見ると）歪み補正が最適でない画像が見えることとなる。

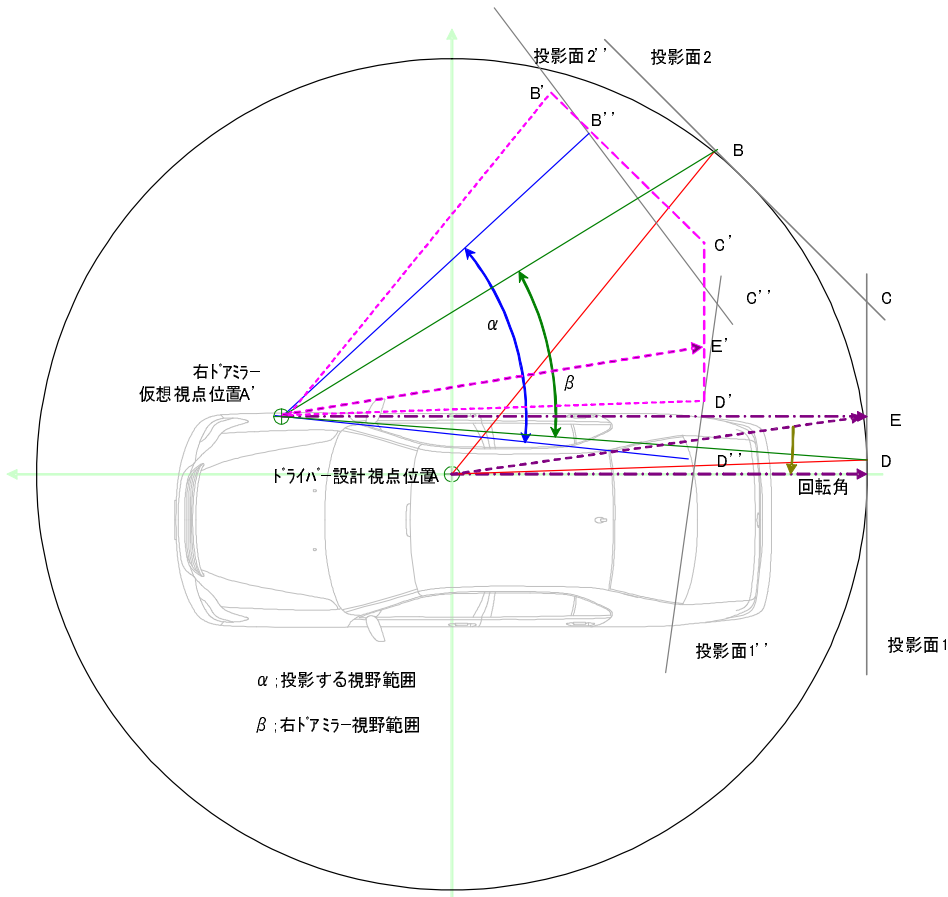


図9 投影面の視線方向と視野範囲（FOV）の関係を保ったまま移動する方式

視点移動補正により、この問題を解決した成果を以下に報告する。

ドーム内部に車両を配置した状態を図9に示す。緑色の線で囲む範囲が右ドアミラーの視野範囲を示す。車両の後方へ映像を投影するプロジェクタがドームスクリーンに外接する仮想の平面スクリーンへ投影した場合の投影範囲を投影面1とする。同じく右後方の仮想スクリーンへの投影範囲を投影面2とする。右ドアミラー仮想視点位置A'からボディに沿って投影面1と垂直に交わる点をEとする(この点はドアミラーにボディが映りこむポイントに相当する)。

まず、ドライバー設計視点位置Aから右ドアミラーの視野範囲を見た場合の頂点BCD(図中、赤実線)の位置関係に注目する。四角形ABCDの形を変えない限り最適な歪み補正からずれることなく映像表示が可能である。そこで四角形ABCDの形を維持しつつ視点位置Aを右ドアミラー仮想視点位置A'へ平行移動し、四角形A'B'C'D'(桃色破線)とする。この時EはE'の位置へ移動する。これはボディの映りこむ位置が、外側のE'の位置に見えることを意味しており、このままでは不自然になる。直線A'E'を直線A'Eに合わせるには、ドライバー設計視点から真後ろへ引いた直線と、ミラー仮想視点位置からのミラー視線方向がドーム面と交わる点(点E)へ引いた直線とのなす角度(図9において“回転角”とする部分)だけ回転させればよい。結果として、四角形A'B''C''D''(青実線)が形成され、A'から見て仮想の投影面1''と仮想の投影面2''に投影される映像を球面スクリーン上に転写することにより、ミラーを介して(仮想視点から)見た際に適正な歪み補正のかかった映像をリアルタイムに描画することができる。

最終的には、上の投影アルゴリズムを元にし、さらに、ルームミラーの映像とドアミラーの映像が重なるのを避けるためドアミラーの映像を図9の反時計周りに回転させる「ずらし角」を加えて表示する。

この方法は、映像発生装置での演算に基づき、描画の位置、領域、視野角をリアルタイムに更新しながら表示する方法であり、知りうる限り類のない方式である。結果、この方法を利用して、ターンテーブルと同期しドームスクリーン上での表示位置を変えることにより、ボディはミラーに映り込んでいないという課題はあるが現実感のある後方映像表示を実現することができた。

5 むすび

今回、後方用映像表示装置に焦点をあてた開発を紹介した。シミュレータの映像表示装置というと前方の視界表示

装置に焦点をあてて述べる機会が多いが、実は後方の映像表示装置も大切であり、かつ、制約が多く複雑である。今後は、更に速度感向上のために右下面の映像表示にも挑戦をしていきたいと考えている。

謝辞

多くの後方用映像表示装置を設計、製作、改良を今まで進めてきた。この間、多くのご指導及びご協力をいただいた関係者の方々に、深く感謝する。

参考文献

- [1] 浅野陽一・内田信行, ドライビングシミュレータ運転席部の回転による運転違和感の低減, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.6-04, (2004), 19-22.
- [2] 米川隆・阿賀正巳・門脇美佐・名切未晴・坂口靖雄・荒木厚, 市街地走行で現実感のあるドライビングシミュレータの開発, 自動車技術会学術講演会前刷集, No.36-08, (2008), 1-6.

[執筆者紹介]



荒木 厚 略歴

1985年入社, 各種シミュレータのソフトウェア設計, システム設計に従事。現在, シミュレーションシステム第二部研究システム課



伊藤 広明 略歴

1989年入社, 各種シミュレータのソフトウェア設計, システム設計に従事。現在, シミュレーションシステム第二部研究システム課



矢野 徹 略歴

1989年入社, 各種シミュレータの映像システム設計に従事。現在, 画像システム技術部画像システム二課

新型講習用シミュレータ DS - 300 の開発

新コンセプト教材を搭載した次世代型シミュレータ

栗田 弦太

要旨： 当社シミュレータは長年に渡り豊富な教材と高い機能で多くのお客様（全国の運転免許センター）にご採用頂いて来た。今回、教育効果の向上ならびに充実した講習の実現を目的として、CG 描画能力向上、多国籍言語 / 聴覚障害対応、新教材「混合交通」等の開発を行い、新型講習用シミュレータ DS*300 として 2008 年 9 月より納入を開始した。本報では、同最新機種の開発について報告する。

1 まえがき

平成 19 年中の交通事故による死者数は 5,744 人で、7 年連続の減少となるとともに、昭和 28 年以来 54 年ぶりに 5 千人台となった。平成 16 年に過去最悪を記録した交通事故発生件数および負傷者も、3 年連続で減少している。

しかしながら、負傷者数は 9 年連続で 100 万人を超えるなど、依然として憂慮すべき交通情勢にあり、交通安全教育の果たすべき役割は、まだ多く残されていると言える。

当社は創業以来 40 年以上、講習用シミュレータを全国の運転免許センターに納入し、交通安全教育に貢献するよう努力を重ねてきた。

特に 1997 年以降、コンピュータグラフィックス (CG) 技術を採用した DS-100, 200 は、全国の運転免許センターに於ける講習の質を高めることに役立つことができたと言える。

警察庁交通局が発表している交通事故のデータを見てみると、死亡事故発生件数及び負傷者数は、1977 年から増加の一途をたどっていたが、2001 年より減少に転じている。この時期は当社 DS が市場に行き渡った時期と重なっており、日本国内の各方面で実施した交通事故撲滅活動の一翼を担えた結果と考えている。今回、DC-1000, 2000, 3000, 4000, DS-100, 200 と引き継いできたノウハウを元に、更なる講習の充実を目指して、新型講習用運転シミュレータ DS-300 を市場に投入した。これにより、教育効果を一層高め、充実した講習に貢献できるものとする。

2 DS-300 の概要

DS-300 は、図 1(a) に示す運転席を、最大 48 台中央制御装置に接続可能である。電源は中央制御装置から集中管理し、中央制御装置と各運転席は 1 GBPS の LAN でつながっている。客先での設置状況を図 1(b) にシステム構成を

表 1 DS-300 機能 / 特徴一覧

No.	機能/特徴	内容
1	CG 描画能力向上	現実に近い街中で周囲の車両が 5 台から 50 台に増え、複雑な道路環境のなかで運転体験が可能
2	大画面・高精細 LCD 採用	32 インチ解像度 1024×768 画素で迫力のある鮮明な映像を表示可能
3	小型化	W790mm×D1276mm×H1390mm 占有床面積で前機種より 8% 小型化
4	AT/MT 簡易切替機能	AT/MT 二つのギヤがワンタッチ切換可能。AT ギヤは P-R-N-D-2-L MT ギヤは 1-2-3-4-5-N-R のフルレンジ
5	多国籍言語対応	日本語、英語、中国語、韓国語、ポルトガル語の字幕が選択可能
6	聴覚障害対応	全ての情報をテロップで表示する。機能聴覚障害者への対応が可能。
7	大型中型対応車種選択	普通車、軽自動車、ワンボックス、SUV、軽トラック、中型貨物、大型貨物の 7 車種
8	新教材「混合交通」	同一コース内を、複数の運転席が同時に走行、受講者同士が影響しあう
9	豊富な教材群	9 教材で 100 パターン以上の場面を有す。

図 2 に示す。

3 特徴

DS-300 は講習用シミュレータの最新機種として以下の機能/特徴を持つ。

4 CG 描画能力向上

DS-300 では前機種 DS-200 より計算機、グラフィックボード (GB) の性能を向上させ、より精細でリアルな CG 映像の発生が可能となった。

また、H/W の性能向上に伴いリアルな景観データベースに変更が可能となった。従来の仮想の町並みではなく、教育・訓練用 DS では始めてとなる、神奈川県内の実際の街

* DS:Driving Simulator . 運転シミュレータ .



(a) DS-300 運転席



(b) DS-300 客先設置状況

図 1 DS-300 写真

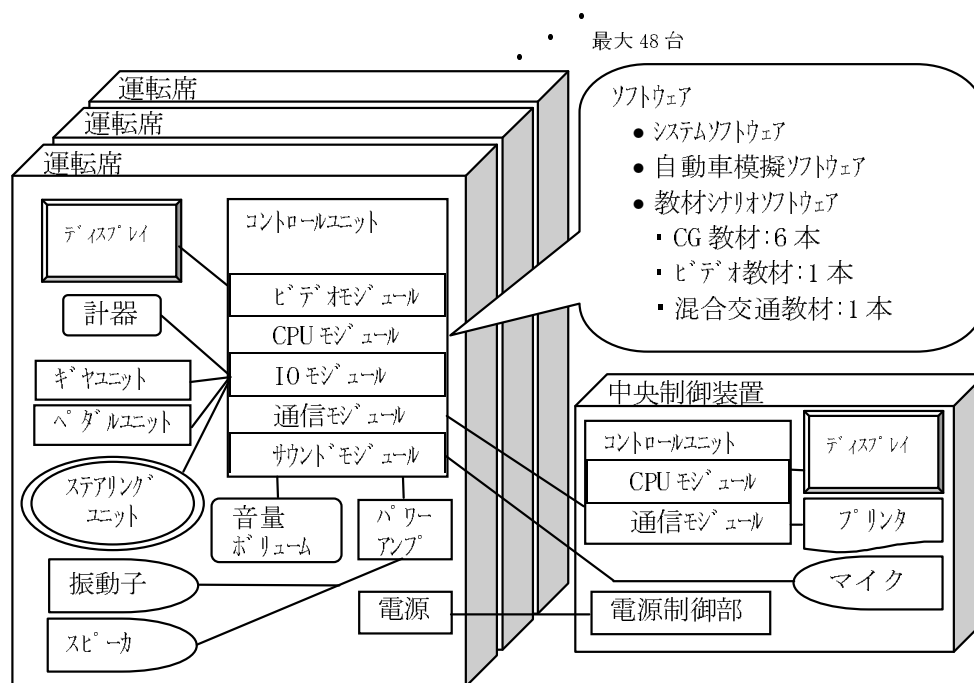


図 2 DS300 システム構成

並みを再現したデータベースを採用した。

また、今まで難しかった歩行者の自然な動きや複雑な交通環境が表現可能となり、高度な交通安全教育が可能となった。

表 2 に前機種との CG 描画能力及び採用データベースの比較、図 3(a) に前機種 DS-200 の景観映像、図 3(b) に DS-300 の景観映像を示す。

5 客先要望対応機能

5.1 多国籍言語対応

昨今運転免許センターにおいても国際化が進み、外国人のドライバーが数多く訪れるようになってきた。これにもない、その人種や言語の多様さにスタッフが対応しきれないケースが増えている。そのような場合は、事前に予約をし、免許センター側で通訳を雇って講習するため、手間とコストが掛かっていた。そこで DS-300 では解説映像全



(a) DS-200 景観映像



(b) DS-300 景観映像

図3 景観映像の比較



(a) 中国語の解説映像例



(b) ポルトガル語の画面表示例

図4 多国籍言語対応例

表2 CG 描画能力及び採用データベースの比較

項目	DS-300	DS-200(前機種)	
CG 描 画 能 力	ピクセル ファイル能力	7.2×10^{12} Pixel/S	3.12×10^9 Pixel/S
	テキスト ファイル能力	9.0×10^{12} Pixel/S	3.12×10^9 Pixel/S
	パーテックス /秒	822.5×10^9	292.0×10^9
	画面更新 レート	60Hz	30Hz
	最大車両 発生数	50 台	5 台
デ ー タ ベ ー ス	データベース 領域	4,320,000 m^2	3,686,400 m^2
	総ポリゴン数	143,836 polygon	80,741 polygon
	トータルテキ スチャサイズ	172.67MB	53.70MB
	使用ビデオ メモリ	216MB	91MB



図5 総ルビテロップ付き解説映像

てと画面表示文字全てを英語、中国語、韓国語、ポルトガル語に翻訳し、テロップにて同時表示することにより多国籍言語に対応した。図4(a)に中国語の解説映像例、図4(b)にポルトガル語の画面表示例を示す。

5.2 聴覚障害対応

2007年4月より道交法改正により、聴覚障害者でもワイドルームミラー装着車という条件つきで、運転免許が持てるようになった。それに伴い自動車教習所等、ドライバーの教育機関で使用するビデオ教材も、聴覚障害者に対応するため、総ルビテロップを挿入する改定が行われている。DS-300はシミュレータとしていち早くこれに対応し、解説映像の総ルビテロップ化だけでなく、映像に表示されるルームミラーのワイド切替機能も追加した。図5に総ルビテロップ付き解説映像、図6にルームミラーのワイド切替



(a) 通常のルームミラー

(b) ワイドのルームミラー

図 6 ルームミラーのワイド切替例

例を示す。

6 新教材「混合交通」

6.1 教材に新たなコンセプト

今までの講習用シミュレータの教材は、それぞれの運転席で独立した画一的なシチュエーションの中を運転し、運転行動を装置が検出、予め決められた基準に基づいてシミュレータが評価をするものであった。新教材「混合交通」とは、シミュレータネットワークと専用の評価・指摘機能（相互評価手法，瞬時指摘機能）を併せ持つ、新しい概念の教材である。

6.2 シミュレータネットワーク

(1) 概要

複数のシミュレータがネットワーク接続で同一の仮想空間を共有することをシミュレータネットワークという。複数の人が運転する車両と、コンピュータ制御された車両を混在させ、自然な道路交通環境を体験することができる。自分から見える他の車は、別の運転席に座っている別の受講者という状況で体験するものである。シミュレータの受講者同士が影響しあう運転環境のなかで、これまでは無いシミュレータ教育が可能となる。

(2) 動作仕様

シミュレータネットワークでは、それぞれの運転席が自車の情報（ID，位置，ランプ点灯等）をネットワーク内で無秩序に通信し合う訳ではない。運転席の中で、制御を受け持つホスト運転席とその指示に従い動作するスレーブ運転席があり、一旦ホスト運転席に情報を集約させる。ホスト運転席では全ての移動物体の情報を更新し、シナリオをコントロールして各スレーブ運転席にデータを送信する。

DS-300 ではこのホスト運転席 1 台に対し、最多で 1 グループ 12 台までのスレーブ運転席が接続可能である。ま

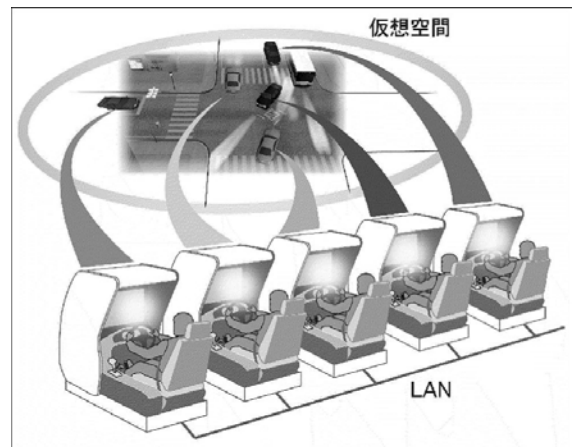


図 7 シミュレータネットワークイメージ

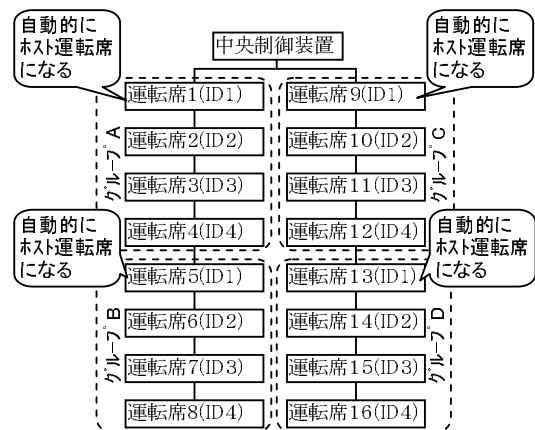
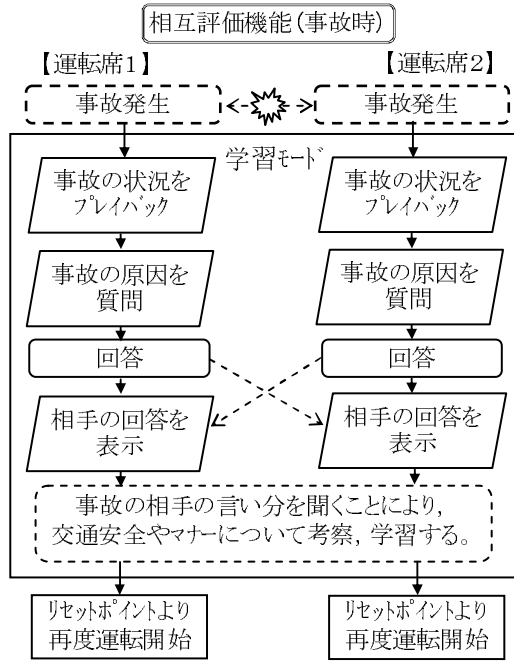
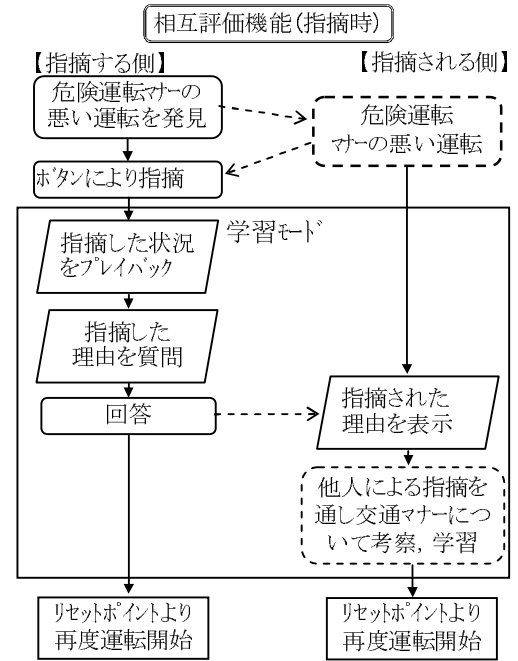


図 8 シミュレータネットワーク動作仕様イメージ

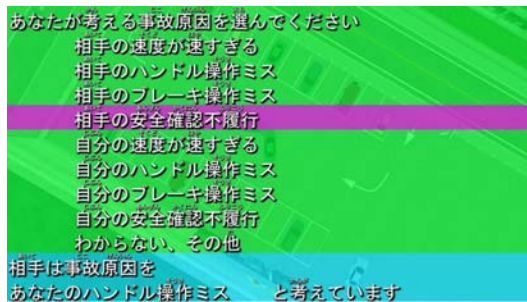
た、運転席は客先により台数が異なるため、中央制御装置より運転席を 4 グループまでの範囲で任意に設定できるようにした。中央制御装置により設定されたグループの中で、一番 ID 番号の若い運転席が自動的にホスト運転席となるように設計した。



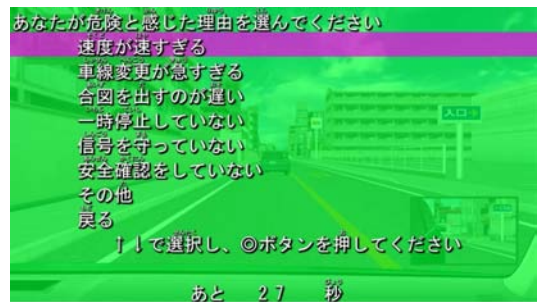
(a) 相互評価 (事故時) 進行フロー



(a) 相互評価 (指摘時) 進行フロー



(b) 事故時質問・回答表示例



(b) 理由質問画面例

図9 事故時の進行フローと画面表示例

6.3 評価・指摘機能

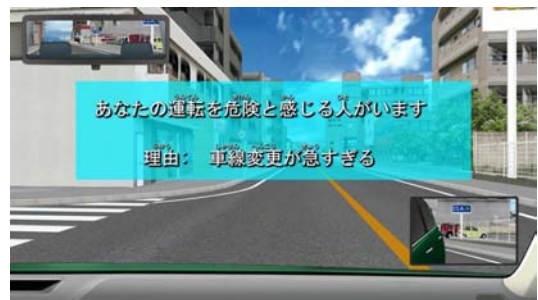
(1) 瞬時指摘機能様

交通法規違反や危険運転をしてしまった運転者に、瞬時にその内容を指摘するものである。違反行動をとってしまった直後に、自動的にプレイバックモードに入り、俯瞰から客観的に振り返る。

従来は一連の場面を全て体験してからの振り返り学習であったが、これに比べ明確で分かり易い指導が可能となる。

(2) 相互評価手法

ネットワークでお互いの運転行動を評価し合う手法である。体験した事故や、前方で繰り広げられる交通状況に対し Q&A 方式で自分の意見を述べる。その意見が別の運転者に伝わりインタラクティブな教育が可能となる。詳細を以下に説明する。



(c) 回答表示画面例

図10 他者を指摘する場合の進行フローと画面表示

① 事故が発生した場合

受講者同士で事故が発生した場合、両者共自動的に交通安全やマナーについて考察、学習するモードに入る。事故の当事者同士でお互いの言い分を相手に伝えるこ

とにより、相手の立場を考慮した考察のきっかけとなる。図 9(a) に相互評価機能 (事故時) の進行を、図 9(b) に事故時の質問と回答表示の例を示す。

② 他車を指摘する場合

運転中、危険運転やマナーの悪い他車を発見した場合、ボタンによりそのことを指摘できる。指摘された運転席は、自動的に交通マナーについて考察、学習するモードに入る。受講者は客観的に自分の行動を振り返ることが可能となる。図 10(a) に相互評価 (指摘時) の進行を、図 10(b)、10(c) に指摘時の理由質問画面と回答表示の例を示す。

7 むすび

2008 年 9 月より山口県警本部殿を皮切りに、全国の運転免許センターへの納入を開始した。2008 年度は納入が完了し、高い品質と機能でお客様にご満足頂いている。

今後は更に多くのお客様に使用して頂けることとなると確信している。

参考文献

- [1] “平成 19 年中の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締り状況について”，警察庁交通局，2008，p2

[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、現在シミュレーションシステム第二部教育訓練システム課

AH-1S 戦闘シミュレータの運用・支援概要

委託整備事業における当社の取り組み

丸山 英幸，山本 達也

要旨： フライトシミュレータの整備形態のうち、委託整備はシミュレータの点検・整備・修理という直接面のサポートと、シミュレータの訓練支援という間接面のサポートをうまく両立させることができる。業務を通して考える委託整備の役割と、機材のより効果的・効率的な運用が可能となるための提案、及びシミュレータの活用例を紹介する。

1 まえがき

当社が設計・製造したシミュレータには、航空機・鉄道・自動車・船舶の操縦（運転）訓練用、航空機・自動車の研究開発用、博物館・遊戯施設における操縦体験用等、それぞれの目的に応じて、さまざまな機能・性能・規模の機材がある。装置の規模に関わらず、稼働率や安全性の確保のため、整備作業は欠かせないものである。その中でも規模が非常に大きな、航空機搭乗員訓練用シミュレータでは、高い稼働率を確保するための方法として、委託整備という整備形態を採り運用している。

本論文は、委託整備とはどのようなものかについて前半で説明し、後半では AH-1S 戦闘シミュレータを例に、シミュレータの訓練支援について説明する。

2 委託整備とは

シミュレータは多岐にわたる様々な技術分野の集合体であるため、その整備・運用には幅広い知識・技術・技能が要求される。

稼働率を維持・向上させるためには故障を未然に防ぐ定期整備と、偶発的な故障発生に対する迅速な対応が重要となる。しかし、それを顧客が全て行うためには、多くの人員と、整備員を育成するための時間と機関が必要であり、現実的ではない。そのため、シミュレータ製造メーカーによる専門的なサポートが有効である。

当社は整備専門担当部門を有する 1 社であり、行っている整備の方式には、以下の形態がある。

- ① 故障発生時に顧客からの要請で人員を派遣するオンコール方式。基本的には顧客が対処できない故障に対してのみ整備を実施する。
- ② 定期的に人員を派遣して予防整備を含めた整備を行う巡回方式。日常の整備（点検等）は顧客が実施する。突発的な故障等、計画外整備に対しては ① に準じて整備

を実施する。

- ③ 常時人員を駐在させ、予防整備を含めた整備を行う常駐方式。日常の整備（点検等）を含めて、シミュレータの保守全般を請け負う。

このうち ③ の方式は、顧客に代わってシミュレータの整備すべてを請け負うことから委託整備と称される。

本論文で述べる当社製 AH-1S 戦闘シミュレータは、昭和 60 年度の初号機から順次納入された全 3 式が、現在も全機稼働中であり、運用開始から現在に至るまで、委託整備方式による運用を行っている。

シミュレータには性能点検や調整を怠ると故障や人員への危険が生じる恐れのある油圧機器等の機構品、並びに操縦桿のように感覚を重要視する機器が存在する。これらの機器は精緻な性能点検調整が必要である事から定期的な点検整備を委託整備の中で実施し、機材の高い稼働率を維持している。

3 訓練支援

ここでは委託整備のもう一つの重要な役割である訓練支援について述べる。

AH-1S 戦闘シミュレータは大別して、教育訓練と練成訓練に供されている。

3.1 教育訓練

パイロットの基礎課程を終了し、AH-1S のパイロットになるための学生教育と、他機種からの機種変更のための転換教育が行われている。シミュレータでの教育は、実機での教育と並行して実施され、飛行安全に留意した教育ができるようにカリキュラムが組まれている。

駐在員は教官と共にシミュレータに同乗し、環境設定の操作を行う。特に射撃訓練においては、学生の習熟度に応じ、目標表示のタイミングも変わるので教官の要求に応じ迅速かつ正確な環境設定が必要となる。そのため駐在員は

全てのシナリオを熟知した上で、教官との連携に細心の注意を払っている。

3.2 練成訓練とその効率化

練成訓練は教育訓練とは異なり、既に AH-1S パイロットの資格を有し、任務を遂行しているパイロットが対象となる。このため、繁忙な実機搭乗の合間をぬってのシミュレータ訓練となることから、効率的に訓練ができるような工夫が重要となる。ここでは、訓練効率をより高めるために新たに「訓練課目カード」を作成したことについて説明し、また、効果的な活用法として、実戦に近い緊張感をもった訓練が実施できる「シミュレータ射撃競技会」について説明する。

3.2.1 訓練課目カードの作成

(1) 背景

部隊においては、主に緊急操作、計器飛行、射撃といった課目を実施しているが、シミュレータの能力としてはもっと多様な訓練に活用することができる。それらの能力を網羅し、課目毎の設定諸元を追加した使い勝手の良い形とすることが必要である。

(2) 有効性の検討

シミュレータの最大の特徴は、実機では体験することが不可能あるいは、可能であるが極めて危険な状況を安全に体験することができることにある。例えば、急激な右ロールが発生するため禁止事項となっているゼロに近い「G」荷重状態の飛行や、危険な飛行特性であるセットリングウィズパワー^{*1}、ブレードストール^{*2}等もどのような挙動になるかを体験することができ、対応操作の訓練も可能である。

また、実機での試験飛行^{*3}に先立って、ハイドロ・パワーシリンダー点検、エンジントップピング点検等、危険に対する注意が必要な項目も、操作手順や機体、エンジン、計器の発現状況をシミュレータで確認しておくことができる。これらを従来の練成課目（緊急操作、計器飛行、射撃）に加え、訓練課目を体系化して、効率的に訓練できる方法を検討した。

^{*1} 回転翼によって、下方に加速された空気流（ダウンウォッシュ）の中にヘリコプターが入り、落下していく現象。

^{*2} 機体の前進速度の増加に比例して、後退側ブレードの迎え角が大きくなり、そのブレードが失速する現象。

^{*3} 機体構造、動力伝達系統、付属装置等が通常環境条件下で定められた機能を発揮するかどうかを点検する機能試験飛行。

(3) 構想

訓練項目を体系化し、シミュレータ機能を十分に生かした説明書とするため、パイロット監修の下、次の様に構想をまとめた。

- ① 本シミュレータで訓練可能な課目を網羅する。
- ② 教官及び訓練者が課目を選び易くするため、文章ではなく表形式にする。
- ③ 1課目を1ページとし、1ページで訓練が完結する。
- ④ 訓練生に対し均一な訓練を行うため、付与可能な模擬故障、目標の状況を記載する。
- ⑤ 1課目の所要時間を記載し、短い訓練時間の中でも組み合わせで時間配分できる。
- ⑥ 携帯できるように、A5サイズのカード形式にする。

名称を「訓練課目カード」とし、図1の様なイメージとした。一部の使用を開始し、使い勝手等のご指導を頂きながら今後改良を加えていく。

(4) 実例

訓練課目毎にどのような訓練ができるかその一部を列記する。

通常操作

- ・エンジン始動・試運転・停止
- ・通常離着陸

緊急操作

- ・直進オートローテーション
- ・180度旋回オートローテーション
- ・両ハイドロ系統故障 at FINAL
- ・両ハイドロ系統故障 at DOWN WIND
- ・テールローターピッチ固定

計器飛行

- ・計器飛行方式航法
- ・ILS APPROACH (RJFT)

戦技飛行

- ・急発進・停止
- ・急反転・急旋回
- ・低空飛行 NOE

夜間飛行

- ・裸眼による離着陸
- ・NVGによる離着陸

射撃

- ・TOW 射撃（固定目標）
- ・TOW 射撃（移動目標）
- ・ASR 射撃（DIR）
- ・ASR 射撃（IND）

番号	15	番号	29	番号	36	
課目	戦技飛行	課目	整備確認飛行	課目	危険操作体験課目	
細目	急反転・急旋回	細目	エンジントップピング点検	細目	LOW-G操作による機体の右ロール	
環境	位置	N33:23:26 E130:25:22 (脊振)	位置	N33:19:13 E130:24:46 (RJDM 上空)	位置	N 33:19:24 E 130:26:36
	速度	60 KT	速度	70 KT	速度	100 KT
	高度	1750 FT	高度	5000 FT	高度	2000 FT
	機首方位	097 (AS REQ)	機首方位	270	機首方位	270
	風向	AS REQ	風向	060 (AS REQ)	風向	310
	風速	AS REQ	風速	05 KT (AS REQ)	風速	10 KT
	ガスト	AS REQ	ガスト	AS REQ	ガスト	AS REQ
	乱気流	AS REQ	乱気流	AS REQ	乱気流	AS REQ
	外気温度	15 °C (地上)	外気温度	30 °C (海面上)	外気温度	15 °C
	大気気圧	29.92 INCH	大気気圧	29.92 INCH	大気気圧	29.92 INCH
	雲底雲頂	0 ~ 30000 FT (AS REQ)	雲底雲頂	AS REQ	雲底雲頂	AS REQ
気象現象	霧、雨 (AS REQ)	気象現象	霧 1	気象現象	霧 1	
全備重量	9300 LBS	全備重量	9500 LBS	全備重量	9500 LBS	
付与故障状況 目標の状況等	※ 日出生台地域の設定も可 N33:17:26 E131:11:33 (小岩嶺山) 2280 FT HEADING 090	付与故障状況 目標の状況等	1 FLAME OUT (553) 2 COMP STALL (554) 3 MAIN DRIVE SHAFT SHORT (761)	付与故障状況 目標の状況等	1 操縦桿とコレクティブを同時に引いて急上昇 操作の後、上昇を始めた後、そのまま操縦桿を 前に押しつつコレクティブを下げる操作を行う。 機体は急激に右へロールを始める。 2 回復操作 : アフトサイクリック	
訓練所要時間	15 分	訓練所要時間	15 分	訓練所要時間	10 分	

図 1 訓練課目カードの例

- ・ GUN 射撃 (TSU GUN)
- ・ GUN 射撃 (HSS GUN)
- ・ GUN 射撃 (FIXED GUN)

整備確認飛行

- ・ ハイドロパワーシリンダー点検
- ・ エンジントップピング点検
- ・ エンジン出力追従点検
- ・ ガバナーエマー系統点検
- ・ 高回転警報灯点検

危険操作体験課目

- ・ LOW-G 操作による機体の右ロール
- ・ セットリングウィズパワー
- ・ ブレードストール

3.2.2 シミュレータ射撃競技会の実施

次に練成訓練において効果的にシミュレータを活用している例としてシミュレータ射撃競技会について説明する。

実機訓練の場合、指揮官は操縦士と射手がどのように連携しながら目標の発見から攻撃までをしているかを詳細に把握することは難しく、クルー間の連携 (CRM) を評価する事は容易ではない。それを補うためにシミュレータ射撃競技会を利用している。競技会中、指揮官は図 2(b) の写真の様に、模擬視界モニターに表示される映像と、スピーカーからの音声を聞くことにより、クルー間の連携を確認する事ができる。更に不意に機体故障を発生させることもでき、緊張感のある実戦的な訓練が可能であり、隊員の技能向上に役立っている。

シミュレータ射撃競技会は次のような流れで実施される。

① 実施要領の作成 (部隊)

効果的かつ実戦的な実施要領を、部隊が検討する。

- ② 実施要領の具体化 (部隊, 駐在員)
シミュレータ上の地形における進路と目標の選定及び攻撃方法を部隊と話し合い、シナリオを作成する。敵の進出や敵のレーダー脅威の配置等も検討する。
- ③ シナリオの具現化 (駐在員)
シミュレータにシナリオの設定を行い、記憶させる。
- ④ 評価基準の作成 (部隊)
目標への射撃の効果の大小、命中率等による評価の基準を作成する。
- ⑤ シミュレータ射撃競技会の実施 (部隊, 駐在員)
定められた基準で各クルーが飛行・射撃を繰り返し、駐在員が教官卓で操作をしながら結果を記録していく。部隊側は競技会中、模擬視界モニターと音声により、各クルーの連携を評価する。
- ⑥ 結果集計 (駐在員)
競技終了後、結果の集計及び各射撃と総合の順位を計算し、部隊に提出する。
- ⑦ 結果発表 (部隊)
講評、表彰式が実施され、結果を今後の訓練に生かしている。

シミュレータでは同一条件下で繰り返し競技できるため、公平な評価が可能である。競技参加パイロットは実戦ながら真剣に取り組み、日頃の訓練成果を発揮している。

シミュレータ射撃競技会実施中の写真を図 2 に示す。

4 むすび

当社ではシミュレータの設計・開発から製造・保守に至るまで一貫した体制を敷いているため、整備担当部門と製造部門との連携が取りやすく、長期間にわたり高い稼働率



(a) 射撃実施場面



(b) 状況観察場面

図2 シミュレータ競技会風景（写真提供：第3対戦車ヘリコプター隊殿）

を維持できている。また、構成部品の製造中止等の代替部品検討や、新規訓練機能の追加工事には全部門一体となって取り組み、実機の用途廃止等によりシミュレータの運用を停止するまで、シミュレータの機能・性能を最良の状態に維持することを目標として、整備作業に従事している。

シミュレータの納入後、時間の経過とともに使用環境が変化していく中、ハード・ソフトの両面においていかに柔軟にサポートしていくかが、保守事業の重要な任務である。

今後とも委託整備の利点を生かして、お客様の要求を敏感に吸収し、それを多角的な提案で実現していくつもりである。

謝辞

本論文執筆にあたり、ご協力頂いた「陸上自衛隊 第3対戦車ヘリコプター隊」の方々には、深く感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 野依忠弘：“ヘリコプター入門＝その空力と操縦＝”鳳文書林，1973年，p.124,127

【執筆者紹介】



丸山 英幸略歴

1983年入社，自衛隊向けシミュレータの保守整備に従事。現在，陸上自衛隊 AH-1S 戦闘シミュレータの保守整備を担当。帯広駐屯地 駐在チーフ



山本 達也略歴

1986年入社，民航向けシミュレータの保守整備を経て，自衛隊向けシミュレータの保守整備に従事。現在，陸上自衛隊 AH-1S 戦闘シミュレータの保守整備を担当。目達原駐屯地 駐在チーフ

手術手技訓練用 VR 手術シミュレータの開発

緒方 正人, 菊川 孝明, 寺田 尚史, 本郷 新, 長坂 学, 高波 健太郎

要旨： 筆者らは、情報通信研究機構より委託を受けて、平成 16 年度より同 20 年度に亘り、実用的な手術シミュレータの基盤技術開発を行った。この開発技術は、既に商用化されている海外製の内視鏡下手術シミュレータと異なり、患者固有データを用いて手術手技の術前訓練ができることが特徴である。現在、横浜市立大学大学院医学研究科との医工連携研究により泌尿器関連の腹腔鏡下手術訓練法を、この計算基盤上に実装し装置の実用化を行っている。本報告は、主にこの手術シミュレータの計算基盤技術に関して報告する。

1 はじめに

内視鏡などを用いた低侵襲手術の普及により術後の患者負担が大きく低減されている。しかし、これらの手術にはこれまで以上に高度な専門知識と多くの経験を積むことが必要であり、近年問題となっている医療事故増加の一因となっている。

現在一般に行われている訓練法は、研修医段階における指導医の立会いによる OJT (On the job training) を除いて、医療機器メーカーによる「実機を用いた機器の操作訓練」と、「ウェットラボ」と呼ばれる豚などの実験動物を用いた模擬手術訓練が中心である。前者は、機器の取り扱いと操作の習得が中心であり、手術手技の訓練ではない。後者は、ある種の実手術であり複雑な訓練が可能である。しかし訓練準備に時間を要したり、必要数の実験動物を準備することが経費上困難であったり、人間と動物の解剖学的差異から手術の訓練が逆に誤った空間的認識を与える可能性があるなどの欠点を持つ。また、内視鏡による手術は術者が主体となるため、従来の開腹手術と異なり、OJT による指導が困難と言われている。以上の諸要因から、訓練コストを考慮した効果的な訓練法の確立が急務となっている。

一方、計算機の高速化とともに 1990 年代初頭から研究開発が盛んになった仮想現実感 (VR) 技術を用いて手術手技を模擬する VR 手術シミュレータが注目されている。この装置は、計算機上に電子的に構築した人体と疾病のデータベースに基づき、操作者に、仮想的な手術環境を作り出すものであり、今日まで、多くの研究開発が行われている [15, 6, 10, 5, 8, 14]。回数に制限なく繰り返し訓練を行うことができる点や、現実には訓練として体験することができない緊急状況も訓練できるなどの利点を持つ。教育・訓練に不可欠な前述の特性から、国内における主要大学の付属病院においても外国製の装置が設置されつつある。

著者らは、平成 16 年から 20 年度まで情報通信研究機構より委託を受けて実用的な手術シミュレータの基盤技術開発を実施した。模擬する手術手順・訓練法に関しては、横浜市立大学大学院医学研究科、人体モデル構築に関しては理化学研究所生体力学シミュレーション特別研究ユニットと共同研究を実施し、継続して実用化を目指している。こ

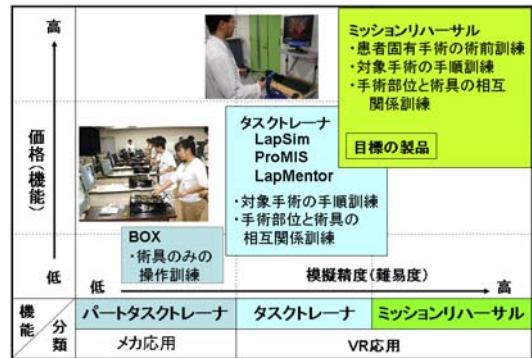


図 1 手術シミュレータの分類：タスクトレーナやミッションリハーサル用が VR 応用である。

のプロジェクトでは、対象部位（臓器、血管および膜組織など）の変形や剥離などによる微妙な術具の操作感を、映像および力感により高精度に模擬できる基盤技術の開発を目標とした。

本論文は、現在横浜市立大学大学院医学研究科との医工連携研究により開発中の模擬手術が実装される計算基盤（プラットフォーム）の主要な要素技術を工学的な立場から報告する。2 章に「手術シミュレータの現状」を、3 章に「開発した技術」、4 章に「試作システム」を、最後の 5 章に「むすび」をそれぞれ示す。

2 手術シミュレータの現状

手術シミュレータをフライトシミュレータとのアナロジーで分類すれば、目的とする訓練から (1) パートタスクトレーナ、(2) タスクトレーナ、(3) ミッションリハーサルシミュレータの三つに分類される。パートタスクトレーナは、手術具のみの操作訓練を主体とし、基本的にはメカ的なものが主流である。タスクトレーナは VR 技術による模擬人体を作り出し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ものである。ミッションリハーサルシミュレータは、手技の高い精度の模擬や、患者固有データに基づき術前のリハーサルにより、予想される危険への事前理解や熟練度を向上させることを目的としている。これに従った手術シミュレータの分類を図 1 に、その訓練目的を表 1 にまとめる。一般的に、分類 (1) から (3) に向かう

表 1 手術シミュレータの訓練目的による分類

番号	分類	主訓練目的	技術的難易度および特徴
(1)	パートタスクトレーナ	器具操作訓練	実術具を用いており実現が比較的容易
(2)	タスクトレーナ	・対象手術の基本手順訓練 ・ハンド・アイ・コーディネーション	中程度： ・パネモデル（表面のみの計算で操作位置に制限あり）
(3)	ミッションリハーサル	・対象手術の基本手順訓練 ・ハンド・アイ・コーディネーション ・手術手技の訓練 ・患者固有手術の術前訓練	一般的に高い： ・有限要素法（内部も計算可能で操作位置に制限なし） ・複雑な接触に対応（臓器 - 臓器，自己接触） ・データ作成機能が必要であり構成技術が広範

表 2 力覚を持つ代表的既存腹腔鏡下手術シミュレータ製品一覧

番号	製品名	製造会社名	国名
(1)	The LapSim	Surgical Science	スウェーデン
(2)	LapMentor	Simbionix	米国
(3)	LaparoscopyVR	Immersion	米国

に従い、模擬機能が増加することから、実現する技術的難易度および装置の価格は高くなる。

2.1 開発と製品化の現状

手術シミュレータを構成する主要技術は、セグメンテーション（対象部抽出）、高速接触判定、実時間力学計算、並列計算、切断切開等の特殊機能、力覚提示等である。なかでも、重要な力学計算に関係した高速接触判定法の研究に関しては、ハッシングに基づく手法 [16, 11] あるいは、木構造に基礎を置く手法 [2, 1, 13] が発表されている。何れも、膨大な数の対象を階層化することにより絞込み、接触判定を高速化する手法である。また、力学計算においては、初期の頃多かった質点パネモデルを用いるものは少なくなり計算精度が保証された FEM で変形計算 [6, 15, 4] を行っている論文が優勢である。また、大変形が可能な有限変形 FEM [4] に関する発表もある。これらの、基本的な技術を組み合わせ、実用的な手術シミュレータは構成されるが、手術シミュレータに関するシステム論文 [10, 14] は少ない。前記、要素技術個別の研究発表 [6, 15, 5, 8, 2, 1, 13] が主体である。

この現状から実用化されている手術シミュレータは、初期の頃に開発され既に確立している要素技術（パネモデル等）を用いて開発されたタスクトレーナであり、分類 (3) のミッションリハーサルシミュレータは未だ実用化されていない。現在、腹腔鏡下手術シミュレータとして実用化されているものは表 1 の分類では、(1) パートタスクトレーナと、(2) タスクトレーナの下位に属す。表 2 に示したタスクトレーナは VR を用いた腹腔鏡下手術の限定的な訓練を実現している。

3 開発技術

著者らは、図 1 および表 1 に示した分類では分類 (3) の前半に属する患者固有のデータに基づく術前訓練装置の開発を目標とした。従って、既存のタスクトレーナと異なり、有限要素法に基づく精度の高い生体の挙動の模擬と、生体モデル作成機能が特徴である。このため、診断時撮像した CT や MRI 等の医療画像から作成した患者固有の模擬臓

器や血管および膜組織などの変形や微妙な術具の操作感を、映像および力感により高精度に模擬できる。

開発した手術シミュレータは、(1) シミュレーションモデル生成装置、(2) 力学計算（接触判定を含む）、(3) ヒューマンインタフェースとしての模擬術具、(4) 高速演算装置、から構成される。以下、開発した基盤技術を構成単位に示す。

3.1 シミュレーションモデル生成

事前に準備された標準的なモデルでなく、患者の診断に用いた CT や MRI データを用いて患者固有のシミュレーションモデルが容易に作成できる装置の開発を目指している。このため、CT や MRI データから直接患者固有のモデルを作成できる機能を実現し、最終的には、医師を含めてレントゲン技師などの医療技術者が容易にモデルデータを作成できる装置を目指して開発を進めている。

この工程は、CT や MRI から訓練する部位の複数の臓器の抽出を行う「生体モデルデータ生成」と、この抽出臓器を統合して実行形式のデータに変換する「シミュレーションモデル生成」からなる。

(1) 生体モデルデータ生成

図 2 にモデル抽出の流れを示す。処理手順は、(a) CT あるいは MRI を入力データとして、指定臓器を抽出する処理（セグメンテーション）、(b) 物性値を付与する処理、(c) 詳細度を加味し有限要素に分割する処理からなる。

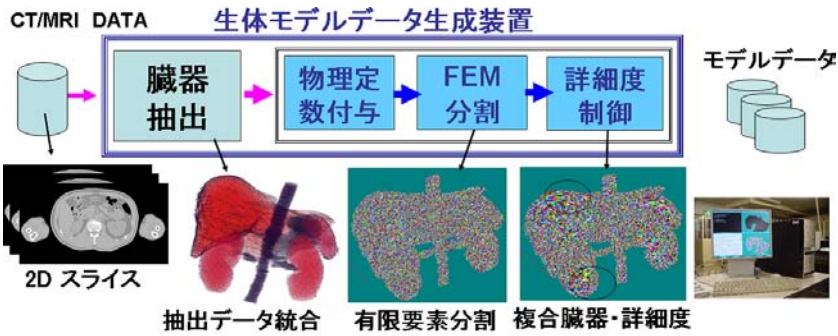
臓器抽出は、図 2(b) に示すように数枚の 2 次元 CT 画像に臓器の対象領域（抽出領域）と非対象領域を教師点^{*2}として与えて行う。教師点を中心として、同一 CT 値を持つ画素を自動的に 2 次元画像内で渦巻き状に探索領域を広げ、同時に 3 次元方向にも探索を行い、該当部位を抽出する。臓器の抽出に関しては、理化学研究所開発の 3 次元リージョンローイング法 [9] を基本として開発した。この抽出した該当部位から 3 次元ポリウムモデルを作成する。

次に、この CT 値（十分でない場合は MRI 値も）^{*3}を基に、各臓器に対し物性値を付与する。この物性値は理化学研究所が公開している標準の物性値を用いている。

最後に、詳細度を考慮して表面パッチ生成後、有限要素分割を行う。臓器表面には、臓器を代表する一般的な実写映像を貼りモデルデータ作成が完了する。

^{*2} 領域内外の CT 値の基準値を決めるための画像上の点であり、作業（通常は医師もしくはレントゲン技師）が目視で確認し、指定する。

^{*3} MRI 画像は組織間コントラストが高く臓器抽出に適している。しかし、幾何的歪みがあるためこの補正機能も実現した。



(a) 医療用データを用いて、臓器単位の抽出（セグメンテーション）、物性値付与、詳細度を考慮した有限要素分割を行う。



(b) 教師点入力：開始点、対象部位および非対象部位の指定を行う。

図 2 生体モデルデータの作成：患者の診断で採取した CT や MRI 等の医療用画像データを直接用いて、臓器単位の抽出（セグメンテーション）、物性値付与、詳細度を考慮した有限要素分割を行う。

```

//=== サンプルモデルデータ ===
// 有限要素で規定された腎臓オブジェクトデータと
// 同血管オブジェクトデータの合成を示す記述例．
//-----
BRANCH{ //2 臓器の結合を示すノードタグ
// *空間での位置やスケールを規定
//以下の木に繋がる全ノードに対して ME で指定した移動・回転・スケール
//を規定する．
ME trans 0,0,0 //平行移動を示す (x, y, z の順)
rot 1,0,0,0//回転量を示す (x, y, z, w の順):クォータニオン表記
scale 1,1,1 //スケールの示す (x, y, z の順)
}
//-----
// *腎臓の有限要素モデル設定 (左側木)
TREE{
ME trans 2,0,0 //平行移動・回転・スケールの規定
rot 1,0,0,0 //
scale 1,1,2 //
PE 1 //並列化時のプロセッサ ID (#1 プロセッサ)
NE kidney.seg //オブジェクトデータファイル名
// (抽出した腎臓の有限要素モデルデータ名)
}
//-----
// *大動脈の有限要素モデルの設定 (右側木)
TREE{
ME trans 0,-2,-1//平行移動・回転・スケールの規定
rot 1,0,0,0//
scale 1,1,2 //
PE 2 //並列処理時のプロセッサ ID (#2 プロセッサ)
NE aorta.seg //オブジェクトデータファイル名
//抽出した大動脈の有限要素モデルデータ名
}

```

図 3 臓器の複合を開発した生体モデル記述言語により規定したサンプル：記述文中で規定されたオブジェクトファイルが前記抽出処理により作成された有限要素モデルデータを示す。

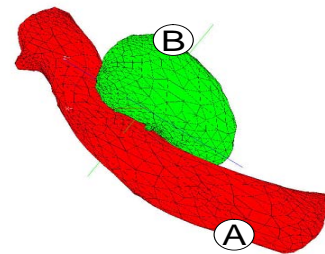


図 4 シミュレーションモデル：（統合例であり人体における実際の位置とは異なる。）A：aorta.seg，B：kidney.seg（図 3 参照。）

当然として、複雑な形状を持つ臓器間や膜組織との接触判定を高速に行う必要がある。術具と臓器および臓器間の力の交換には、接触点間で、お互いに変位を与え、辻褃のあった変位に繰り返して収束させる（即ち間接的に外力を求めている）ペナルティ法を基本としている。以下に詳細を示す。

(1) 線形粘弾性モデル

従来のフライトシミュレータでは、数点の重心での運動を計算すれば良いが、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。

計算モデル：上の理由から数学的には偏微分方程式で規定された式 (1) 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。

$$\nabla T + \rho \left(g - \frac{d^2 u}{dt^2} \right) + \nu \frac{du}{dt} = 0 \quad (1)$$

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、 u は変位ベクトル、 ν は粘性を示す。上式の物理的な意味としては、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、その動きに起因する慣性力が 2 項

(2) シミュレーションモデル生成：臓器モデルの統合

抽出モデルを組み合わせる実時間シミュレーションモデルを作成する。統合は、生体モデル記述言語により規定する。図 3 に生体モデル記述言語のサンプルを示す。図 4 に、この規定に従って複合したシミュレーションモデルの幾何形状を示す。各部位の空間的な位置やスケールは記述言語の規定により任意に変更できる。この機能を用いて、CT データ撮影時と術中では患者の体位が違うことによる臓器位置の変化に対応した初期模擬シーンの作成も可能である。

3.2 力学計算

変位-歪みの関係に関しては、実時間処理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ている。また、手術シミュレータでは臓器と術具の接触判定は

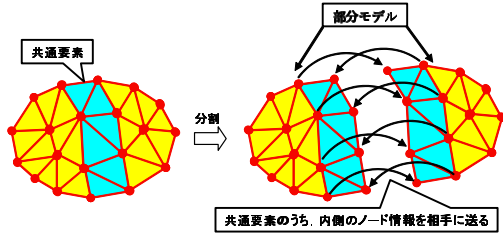


図5 モデルの並列処理化：部分モデルを各 PC で計算し，共有ノードについて PC 間でデータ交換を行う。

に，粘性による抵抗力が3項に発生し，それらが平衡していることを示す．上式(1)を精度を保証して数値的に解くため，以下の有限要素式に変換する．

$$M\ddot{U} = F - C\dot{U} - KU \quad (2)$$

ここで U はモデルデータの節点変位ベクトル(各節点変位 u の組み合わせ)， M は質量マトリクス， 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 を用いて有限要素内 V_e で以下の体積分から決まる． M および C についても同様に領域内の体積分による．

$$K = \sum_e \int_{V_e} \underbrace{B^T DB}_{\text{要素剛性マトリクス}} dv \quad (3)$$

さらに実時間処理するため，有限要素式(2)を微分方程式に変形し，数値積分することで節点変位が実時間更新される．

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -M^{-1}C & -M^{-1}K \\ I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U} \\ U \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

並列処理：処理は，オブジェクト(臓器)単位の並列処理を基本としているが，オブジェクトの負荷が重い場合は，オブジェクトを空間的に分割した並列処理も可能である．空間分割による並列処理の場合は，各ノード PC は，境界要素を重複している部分要素モデルを担当する．毎回の变形計算後，境界要素のデータを交換する．図5に，空間分割による並列処理の例を示す．

(2) 接触部の高速検出

高速に接触判定を行うためモデルの構造化を2進木により行う．接触判定処理は，シミュレーションの初期化時に行う「2進木の構築」と，2進木の探索による実行時の「接触部の検出」からなる．

2進木の規定には，木の分岐部，途中あるいは末端部(ノード)にメタデータと呼ぶ当生体データの構造化情報を持つ．これは，生体モデル記述言語で規定され，以下の5種類からなる．(1) バウンディングエレメント BE，(2) モディファイドエレメント ME，(3) コネクションエレメント CE，(4) ネームドエレメント NE，(5) プロセッサエレメント PE，表3に上記メタデータの機能をそれぞれ示す．

2進木の構築：

次の2段階で行われる．まず，構築手順1として生体モデル記述言語で規定した物体間の接続(図3参照)をそのまま2進木とし，言語中の NE 文で規定されたオブジェクトデータを2進木のノードとする．次に構築手順2として2進木のノードであるオブジェクトデータを4面体要素を基準に再帰的に分割し，2進木を完成する．図6(a)に生体モデル記述言語で規定した内容から生成した2進木と，さらに NE ノードにより規定した有限要素モデルを再帰的に2進木化する処理を示す．図中の各ノードは，高速接触判定処理に使用するバウンディング情報を持つ．この木構造の構築は，シミュレーションの初期化時のみ行い，物体の初期位置を表す．

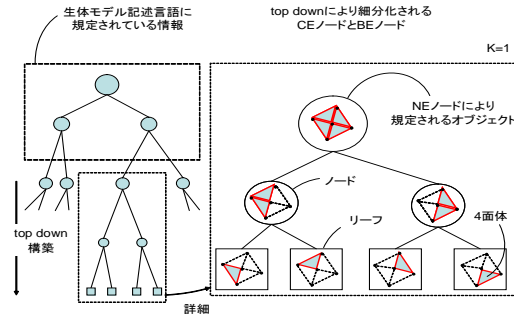
接触部の検出：シミュレーション時に図6(b)に示すように，木の先頭から処理対象の左右にある木のバウンディングボックス間で2進木を探索して接触判定を行う．接触の場合は，さらに下の木を探索し，接触判定を行う．非接触の場合は，このレベルでは接触がないので上のノードに戻り，対象を変えて全ての接触判定処理を繰り返す．この処理では木構造の再構築は行わず更新のみ行う．この木構造と並列処理により，接触検知時間は， N を並列数， P を表面を構成する有限要素数として，通常 $O(P^2)$ の計算量のオーダが，

$$O(P) + \frac{1}{N}O(P \log_2 P) \quad (5)$$

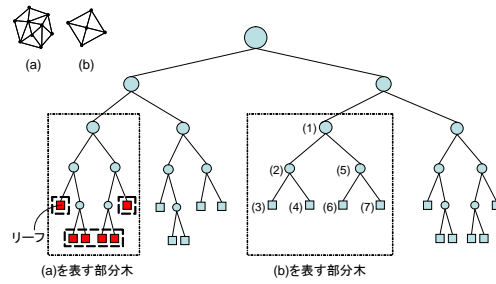
に削減され，複雑な接触判定が実時間で可能となった．

表3 生体モデル記述言語の構文と対応するメタデータの機能

メタデータ種類	略記	機能	備考
バウンディングエレメント	BE	下位の要素を凸包する6面体：ポリゴンを凸包する6面体	
モディファイドエレメント	ME	以下の木に対して回転，拡大，平行移動量を与える	初期化に使用
コネクションエレメント	CE	左右の木の連結(あるいは分岐)を示す	
ネームドエレメント	NE	オブジェクトデータ名(実体 FEM データ名)	
プロセッサエレメント	PE	オブジェクトを割り当てるプロセッサ ID	並列化時に使用



(a) 2進木構築手順: NEノードで規定されたオブジェクトデータを4面体要素を基準に細分化して木構造を自動発生する。図では、細分化の指標 K を1としているので、最終の有限要素単位(4面体)まで細分化されている例を示す。



(b) 接触部位検知手順(トラバース処理): 枠内は用いる要素を, (数字) は辿る順番を示す。

図6 木構造(メタオブジェクト)の構築と接触部の探索: 木構造の発生は、生体モデル記述言語により規定された木構造の発生と、各オブジェクトに対応する木構造の自動発生の2段階からなる。接触部の判定は木構造を上から辿ることにより大きなブロック単位での接触判定が早い段階で行われ、無駄な探索を削減する。

(3) 複合臓器の処理

臓器を通して、他の別の臓器に力が伝わる複合臓器や自臓器が自己の他の部分に接触して力が伝わる自己接触の場合などにおいては、この外力が直接的に計算できない。しかし相互に接触する点が分れば、この外力はペナルティ法により間接的に求められるので、前述のように変位が計算できる。即ち、接触点(臓器表面を構成する有限要素の表面ポリゴンを成す節点)に、仮の外力 F_c を一旦与え、式(4)から変位を求めることを繰り返すことにより平衡させる。この一旦与える、仮の外力は、接触部の干渉深さを d とすると、

$$F_c = K_p d \quad (6)$$

で与えられる。ここで、 K_p はペナルティ係数である。

(4) 切除処理

臓器切除の模擬手法には、切断部に新たな節点及び要素を生成することが考えられるが、この場合剛性マトリクスの再構築が必要であり、リアルタイム処理は困難となる。また切断が進むと同時にマトリクスの次元が増加する。これらを防ぐため、切断部分の要素を消去することで切除を模擬した。特定要素の消去は、全体剛性マトリクスから要素剛性マトリクスを減算することで表現できるため、リアルタイム処理が可能である。

3.3 模擬術具による手術環境の模擬

図10(b)に模擬した手術環境を示す。手術環境は、模擬腹腔鏡モニター部、模擬術具部からなる。腹腔鏡モニター部は通常の液晶表示装置を用いている。模擬術具は、腹腔鏡および2台の自社製の3自由度の力覚装置(図7に示す)のUpper Plate部にある2自由度のジョイントに実際の鉗子を取り付けて点接触の力覚を模擬している。力覚装置はパラレルリンク構成をとっており高剛性を模擬できる。装

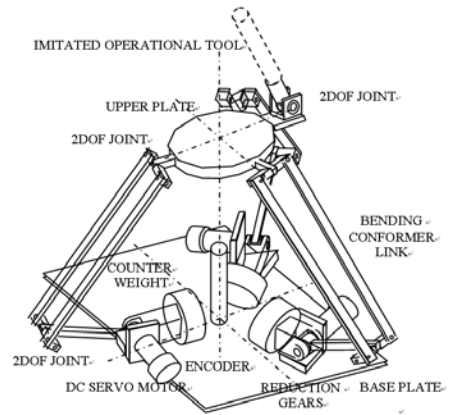


図7 力覚装置: パラレルリンク方式の力覚装置構成

表4 力覚装置の仕様

番号	項目	機能性能
(1)	自由度	x, y, z 3自由度
(2)	動作範囲	150x150x150 mm
(3)	発生力	10N 各自由度方向

置の仕様を表4に示す。

3.4 高速演算装置

全ての処理を実時間(33ms)で行う必要がある手術シミュレータの開発においてはコストパフォーマンスの良い高性能計算機を持つことが重要である。このため、自社開発の専用ネットワークと汎用計算機を組み合わせる専用計算機を構築している。その構成を図8に示す。構成は、手術部位や手術法が異なることによる計算量の増減に対応できるように、模擬対象の必要計算規模に応じて計算能力を増減できるクラス構成をとっている。

GPU利用: 計算性能に関しては、汎用計算に適した従来のCPU以外に、連続したデータ(ストリーム)の処理に向くストリーム型プロセッサの一種であるGPUを併用し

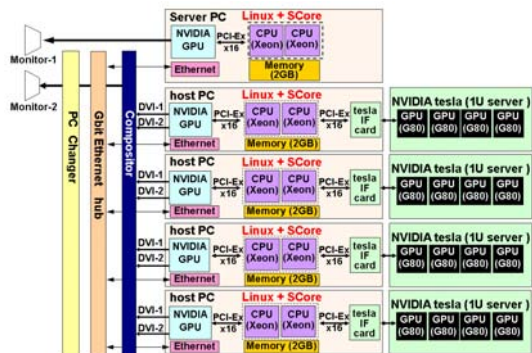


図 8 高速演算装置の構成：映像発生に伴う通信を専用ネットワークを用いることにより通信の輻輳を低減して、並列化率を高めている。

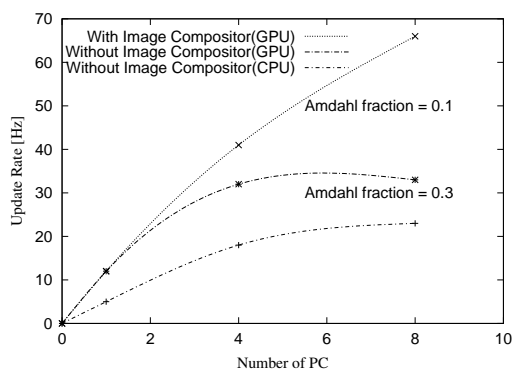


図 9 画像発生に専用ネットワーク(画像合成装置)を用いる効果：未使用の場合は並列化効果が得られていない。使用した場合は、並列化率が向上する。未使用時の Amdahl 係数は 0.3 程度であるが、使用時の場合は 0.1 程度に改善されている。

てコストパフォーマンスの改善を図っている。規則的でパイプライン化可能な数値計算は GPU により、分岐等の判断を伴う不規則な処理は CPU で実行している。

並列化率向上：並列計算に避けられない計算機間通信による並列化率の低下は、力学計算に伴う通信と、画像発生に伴う通信を画像合成装置により物理的に分離することにより改善できる [7]。力学計算に伴う通信経路は、臓器接触部位が動的に変化したり、モデルに依存して変わるので市販の汎用高速ネットワークを用いている。一方、映像発生に伴う通信は通信経路が固定されるため、自社開発の映像に特化した専用ネットワーク(画像合成装置)を用いた。

図 9 は、通信を分離した場合と分離しない場合の並列化効果の差異を示している。ここでは、総節点数 29,234 の臓器データをほぼ均等に並列化し、複数の計算ノードで変形計算を実施した。通信を分離しない場合 Amdahl 係数^{*4}が 0.3 程度であるが、分離した場合、等価的に 0.1 程度に改善されている。

画像発生に伴う通信を分離しない場合、画像生成のため

^{*4} 並列性能指標。並列化できない比率を示し、この逆数で示される並列数が理論的な処理の飽和を示す。

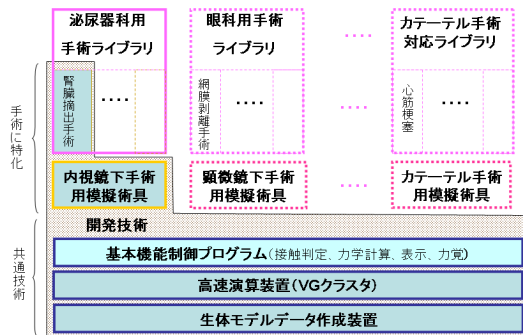


図 11 開発したプラットフォームと手術シナリオの対応：横浜市立大学大学院医学研究科と共同で泌尿器関係のシナリオを作成中

各計算ノードの節点変位ベクトルを集める必要があり、その通信データ量は、イタレーションあたり約 750KByte である。通信分離をしない場合は、この通信負荷のため 4 並列(PC 数)で性能が飽和しているが、分離をした場合は、8 並列以上でも台数効果がある。

4 試作システム

図 10 に、前述の開発した要素技術を統合して試作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、生体モデル生成装置と手術シミュレータ装置本体から成る。また、本体は高速演算装置と模擬術具から成る。図 10(a) に生体モデル作成装置の概観を、(b) に手術シミュレータ本体の概観を示す。また、図 10(c) に高速演算装置の概観を、(d) に模擬術具の概観を各々示す。

4.1 制御

手術シミュレータの処理ブロックを図 12 に示す。図 (a) は全体の制御を、(b) には力学モデルと力覚装置間の制御を示す。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、力覚装置の制御方式は、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) を基本とするオープンループである [12, 3]。この系に術具操作者が入ることによりヒューマンインザループ (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。

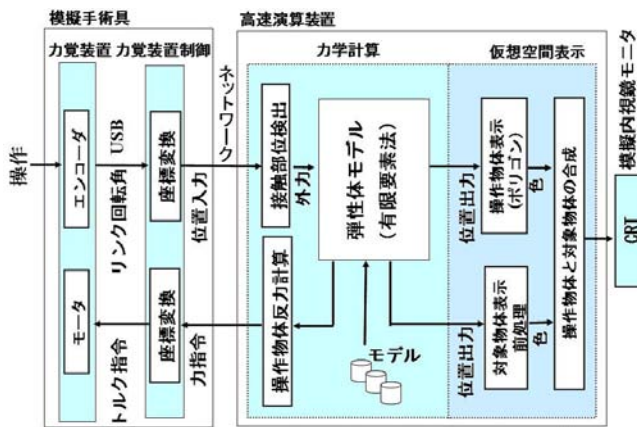
図 13 に、現時点での手術シミュレータの出力映像例を示す。表示例は、泌尿器関係手術で最も重要な血管周りに付着するリンパ管組織の除去を示している。図 13(a) (b) (c) (d) の順が手術の順番に対応する。適用データは、総有限要素数 33,581、総節点数 8,174 である。また、上記シミュレーション場面の処理時間を表 5 に示す。

4.2 共通技術

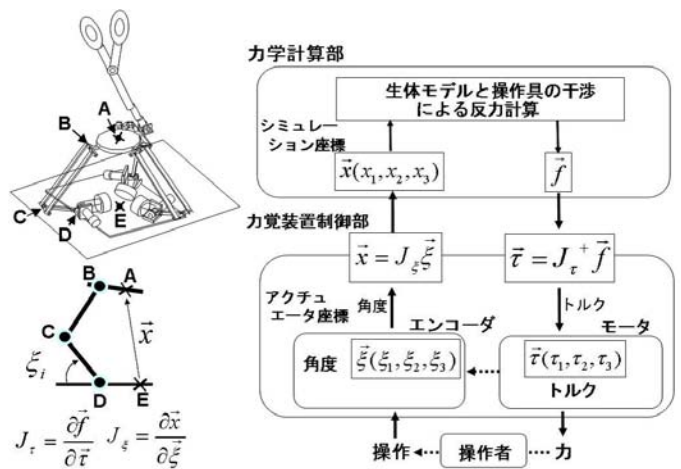
図 11 は、開発したプラットフォームと手術シナリオの対応を示したものである。図に示すように共通技術部(プ



図 10 開発した手術シミュレータ計算基盤の概観：生体モデル生成装置，手術シミュレータ本体からなる．手術シミュレータは高速演算装置部と模擬術具部よりなる．高速演算装置は模擬の程度により計算能力の増減が可能．また，模擬術具も模擬手術に応じて換装が可能．



(a) 手術シミュレータ制御ブロック



(b) モデルフィードフォワードオープンループ：操作者を入れて系が閉じる． J_r^+ はヤコビ行列の一般化逆行列を示す．

図 12 手術シミュレータ本体の処理ブロックと制御方式：模擬術具部と，高速演算装置部から成る．模擬術具部と高速演算装置間はネットワークにより接続している．

表 5 手術シミュレーション処理時間

処理項目	複合	接触	変形	切除	通信	描画
処理時間 [ms]	1.4	6.3	12.0	1.5	1.9	8.0

ラットフォーム)と手術に特化した部分に分かれる．共通技術部は手術によらず共通であり，手術対応の模擬術具と手術ライブラリは交換が必要である．

手術ライブラリとは，一連の手術手順を性質により分割した複数場面から構成される．例えば泌尿器科の右腎臓摘出手術の場合，トロッカ挿入，気腹，術野アプローチ，腎臓掌上，脂肪組織及びリンパ管排除，腎動脈及び腎静脈クリップ，血管切断，及び腎臓摘出からなる．これらは状況を制御するシナリオプログラムであり，各手術に固有である．訓練では場面の組み合わせを選択可能である．

5 むすび

開発した技術基盤は，多臓器間の複雑な接触に伴う変形，自己接触に伴う変形等，従来，実時間模擬が困難であった

技術を実用化し，複雑な手術手順のシミュレーションを可能とした．現在，この計算基盤の上に，横浜市立大学大学院医学研究科との共同研究により，泌尿器関係の手術シナリオを実装している．この開発技術の上に，医師の知識をシナリオとしてまとめ泌尿器関係の手術訓練が可能な手術シミュレータの実用化を早急に図りたい．

一方，製品としては人体部位により医師の知識が極めて専門化されており，細分化された部位に対応して各種の手術法が存在する現状にどのように対応するか等，課題が多々ある．しかし開発装置は，これらの細分化された手術法が容易に基盤技術上に実装される層構成を採っているので，適用分野の選択により製品化につなげたい．

さらに，製品開発と平行して次の基礎研究として，計算量と模擬精度の兼ね合いを見極めながら，前記枠組みと異なる実時間非線形有限要素法あるいはその近似に関する研究に早急に着手し，さらに精度の高い手術手技訓練の実現性に目処を付けたい．

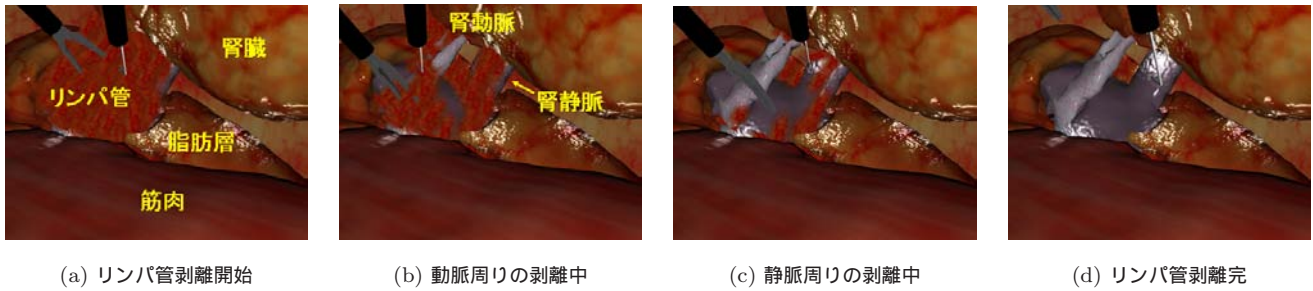


図 13 手術シミュレータの出力映像例 (血管周りのリンパ管組織剥離): 有限要素数 33,581, 節点数 8,174, 更新レート 30Hz

謝辞

長期に亘り, ご指導頂いた横浜国立大学 土肥康孝名誉教授, 梶原技術士事務所 梶原景範, プサイ 藤野勝; 共同研究者 横浜市立大学大学院医学研究科 窪田吉信教授, 槇山和秀; 理化学研究所生体力学シミュレーション特別研究ユニット 室長 姫野龍太郎, 横田秀夫, 島井博行の諸氏に感謝いたします。また, 研究参加者 坂本英男, 後藤修一, 他多くのご支援を頂いた方々にこの場を借り感謝いたします。本研究は独立行政法人 情報通信研究機構の委託による。

参考文献

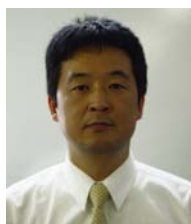
- [1] Ericson, C.: *Real-Time Collision Detection*, Morgan Kaufmann publishers (2005).
- [2] Larsson, T. and Akenine-Möeller, T.: Collision detection for continuously deforming bodies, *Proceedings to Eurographics'01*, pp. 325–333 (2001).
- [3] Maass, H., Chantier, B. B., Cakmak, H. K. and Kuhmapfel, U. G.: How to Add Force Feedback to a Surgery Simulator, *IS4TM*, pp. 165–174 (2003).
- [4] Mendoza, C. and Laugier, C.: Tissue Cutting Using Finite Elements and Force Feedback, *IS4TM*, pp. 175–182 (2003).
- [5] Meseure, P., Davenne, J., Hilde, L., Lenoir, J., France, L., Triguët, F. and Chailou, C.: A Physically-Based Virtual Environment Dedicated to Surgical Simulation, *IS4TM*, pp. 38–47 (2003).
- [6] Nakao, M., Minato, K., Kume, N., ichiro Mori, S. and Tomita, S.: Vertex-preserving Cutting of Elastic Objects, *IEEE Virtual Reality*, pp. 277–278 (2008).
- [7] Ogata, M., Kikukawa, T., Kajihara, K. and Terada, T.: An Evaluation of the Communication Cost of Parallel Processing in Real-Time Simulation Using an Image-Composition Device, *Journal of IPSJ*, Vol. 47, No. SIG7, pp. 152–161 (2006).
- [8] Petersik, A., Tiede, B. P. U., Hohne, K.-H. and Leuwer, R.: Realistic Haptic Interaction in Volume Sculpting for Surgery Simulation, *IS4TM*, pp. 194–202 (2003).
- [9] Shimai, H., Yokota, H., Nakamura, S. and Himeno, R.: Extraction from Biological Volume Data of a Region of Interest with non-uniform Intensity, *Proceeding of SPIE(Optomechatronic Technologies)*, pp. 60515(1)–60515(10) (2005).
- [10] Suzuki, S., Suzuki, N., Hattori, A. and Uchiyama, A.: Dynamic Deformation of Elastic Organ Model and the VR Cockpit for Virtual Surgery and Tele-surgery, *MMVR11*, pp. 354–356 (2003).
- [11] Teschner, M., Heidelberger, B., Müller, M., Pomenets, D. and Gross, M.: Optimized Spatial Hashing for Collision Detection of Deformable Objects, *Proceedings to VMV'03*, pp. 47–54 (2003).
- [12] 岡崎博善: ハプティックデバイスの開発, No. 1717, 三菱プレジジョン技術報告, pp. 1–34 (1999).
- [13] 足立吉隆, ホウステファン, シャルマサンジェイ, 池本明夫, 熊野宜弘: Haptic CAM システムの開発, *精密工学会誌*, Vol. 68, No. 4, pp. 591–596 (2002).
- [14] 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, Vol. 84, No. 6, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, pp. 1213–1221 (2004).
- [15] 井上悠介, 増谷佳孝, 石井宏一, 熊井規, 木村文彦, 佐久間一郎: 有限要素法及び可変形ポリウムレンダリングを用いた高画質な手術シミュレーションシステムの開発 (手術シミュレーション), Vol. 87, No. 1, *電子情報通信学会*, pp. 271–280 (2004).
- [16] 原田隆宏, 田中正幸, 越塚誠一, 河口洋一郎: グラフィックスハードウェアを用いた個別要素法の高速度化, *日本計算工学会論文集*, Vol. 2007 (2007).

[執筆者紹介]



緒方 正人 略歴

1970 年入社，主にフライトシミュ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．技術開発部 画像情報グループ所属．技術士（情報工学），工学博士



本郷 新 略歴

1990 年入社，主に画像発生装置に関する研究開発に従事し現在に至る．技術開発部 画像情報グループ所属．



菊川 孝明 略歴

1990 年入社，主に高並列画像発生装置の研究開発および交通安全教育用ドライビングシミュレータの開発設計等に従事し現在に至る．技術開発部 画像情報グループ所属．



長坂 学 略歴

2001 年入社，フライトシミュレータの開発設計に携わり現時に至る．技術開発部 画像情報グループ所属．



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ミュレータ，ハブティックデバイスの研究開発に従事し現在に至る．技術開発部 画像情報グループ所属．



高波 健太郎 略歴

2002 年入社，フライトシミュレータ及び鉄道シミュレータの S/W 設計に携わり，現在に至る．技術開発部 画像情報グループ所属．

新型車番認識システム

館 和嘉, 関 真規人

要旨： 車番認識システムは、車両のナンバープレート全文字を自動で読み取るものであり、駐車場システムでは、月極契約車の自動入退場、及び事前精算済車両の出口自動ゲート開運用などに応用されている。駐車場利用の車番認識システムでは、多様な設置環境、高い認識率、認識処理時間の高速化を求められる。本論文では、現行機の機能向上のために開発した「新型車番認識システム」について報告する。

1 まえがき

当社では 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取するシステム）を開発・納入してきた。

一方、近年では DSRC^{*1} を使用した入出場システムが構築されてきたが、DSRC 車載器が車両に必要であることなどから、一般駐車場では普及が進んでいない。このため不特定多数の利用者（車両）を識別する手段として、現在でも注目されているのが「車番認識システム」である。車番認識システムは、駐車場機器と連動することで、以下のようなシステムに応用されている。

- 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 入出口の渋滞緩和対策
月極契約車は車番で入出場フリー
事前精算済車両は出口で自動ゲート開
- 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

近年では、「駐車場セキュリティ対策」においても、工場入退場管理として車番認識システムが注目されている。現在の車番認識システムは、開発から約 10 年が経過しており、性能アップ、及びコストダウンにより、更に市場競争力を確保すべく、今回新型車番システムを開発した。

2 概要

2.1 車番認識システム

車番認識システムは、車両を検知する「光電センサ」、車番を撮像する「カメラ装置」、撮像した画像から車番を読み取る「画像処理装置」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）と駐車場用シリアル通信回線（パーキングバス）にて

表 1 性能比較表

項目	現行機	開発品	
対象プレート	中型・大型プレート		
認識方式	テンプレートマッチング (文字毎の辞書データとのマッチング)		
認識文字	全文字		
撮像方式	近赤外線		
撮像トリガ	光電センサ検知		
撮像距離	3,000mm		
撮像範囲	幅	2,500mm	2,600mm
	高さ	1,000mm	1,000mm
許容プレート	左右	± 5° 以内	± 10° 以内
	上下	± 20° 以内	± 20° 以内
	回転	± 5° 以内	± 5° 以内
撮像画像保存	画像処理装置に保存	メモリ装置に保存 (オプション)	
メンテ用機器	不要 (付属品にて可)	要 (調整用モニター・PC 接続)	
カメラ接続数	4ch	1ch	
処理装置設置環境	屋内	屋外	
カメラ装置設置	アイランド自立型		

接続することで、様々なサービス（1 項 ①～③）を実現する。図 1 に駐車場機器と連動した「車番認識システム」の動作フローを示す。

2.2 開発コンセプト

本開発は、車番認識システムにおいて、カメラ装置と画像処理装置に関する機能向上を目的に開発した。主な機能向上内容は以下の通りである。また、現行機との性能比較を表 1 に示す。

(1) カメラと画像処理装置の一体化

現行機は画像処理装置として専用パソコンを使用している。このため、設置時は空調環境のある場所（駐車場管理室等）に設置する必要がある。駐車場出入口から駐車場管理室までの配管配線工事が必要であった。そこで、本開発では画像処理機能を専用ハードウェア化（画像処理基板）

^{*1} DSRC : Dedicated Short Range Communication . ETC などに用いられている双方向無線通信技術。

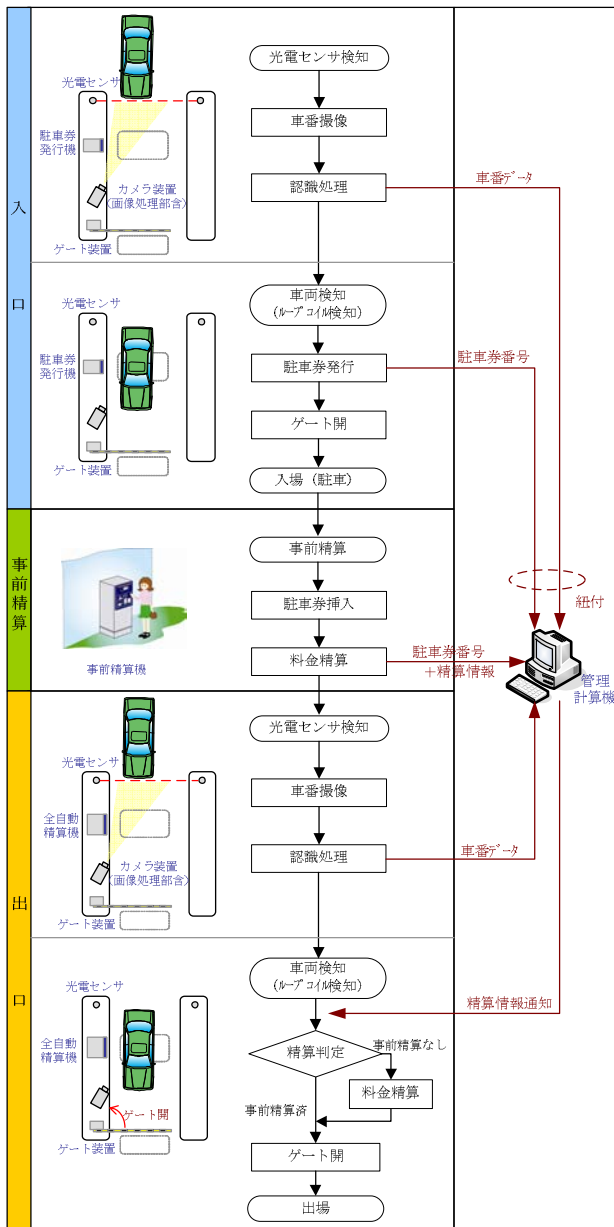


図1 車番認識システム動作フロー

することで、カメラ装置と画像処理装置の一体化を実現した(図2)。一体化することにより、対環境性向上、工事費削減、省スペース化等のコストダウンを実現した。

(2) 認識プレートの対象拡大と認識率向上

駐車場での設置環境では、車両が右左折して進入してくる場合があり、必ずしも正対した画像を撮像できない。このため、現行の認識アルゴリズムを改良して、進入角度の拡大、及び撮像範囲の拡幅を実現し、設置自由度を向上するとともに、認識率の向上を実現した。

3 車番認識アルゴリズム

3.1 概要

車番認識は大きく分けて3つの処理からなる(図3)。ひとつは、撮影された画像からナンバープレートを探査する処理である。ナンバープレートは自家用と業務用、軽自動車用と普通車用などで色やサイズに違いがあり、車番認識ではそれらすべてに対応する必要がある。

二つ目は、見つかったナンバープレートの部分画像(以下、プレート画像と呼ぶ)を切り出し、文字認識に適した画像へ変換する処理である。通常は斜め横から撮影しているため、画像上でのナンバープレートは見かけ上、変形している。この見かけの変形を戻して、仮想的に正面から撮影された画像に正規化する。

最後は、正規化されたプレート画像から陸運支局コード(地名)、車種コード(2または3桁の数字)、用途コード(ひらがな)、一連番号(4桁の数字)、を読み取る処理である。これらの文字認識は、辞書としてあらかじめ記憶している文字パターンとの比較により行われる。

(1) ナンバープレートの探索

ナンバープレートは法令で規格化されているものの、色やサイズにバリエーションがある。そのため、まず、画像から色に不変な特徴を抽出する。具体的には微分フィルタを施し、エッジ画像を生成している。このエッジ画像からナンバープレートを探査する。

ナンバープレートの探索にはテンプレートマッチング手法[1]を用いる(図4)。テンプレートマッチングは、パターン認識における典型的な手法であり、あらかじめ用意された小さいパターン画像(テンプレート)を探査画像に重ね合わせ、画素値を比較することにより、テンプレートに類似した位置を検出するものである。今回、テンプレートは、ナンバープレートの文字領域を塗り潰したパターンとして用意している。また、先に述べたサイズのバリエーションに対応させるため、大きさの異なる6種類のテンプレートを用意する。

探索画像上の位置 (x, y) におけるテンプレートとの類似度 R_{SAD} は次式(1)により計算される。ここで、 I は探索画像、 T はテンプレート、 M, N はテンプレートサイズを表す。式(1)で表される尺度は画像間の差分絶対値和(SAD: Sum of Absolute Difference)を求めるためのものであり、値が小さいほど類似度が高いことを表す。

$$R_{SAD}(x, y) = \sum_{j=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{M-1} |I(x+i, y+j) - T(i, j)| \quad (1)$$

一般に、類似度の高い位置は、ナンバープレート以外の偽

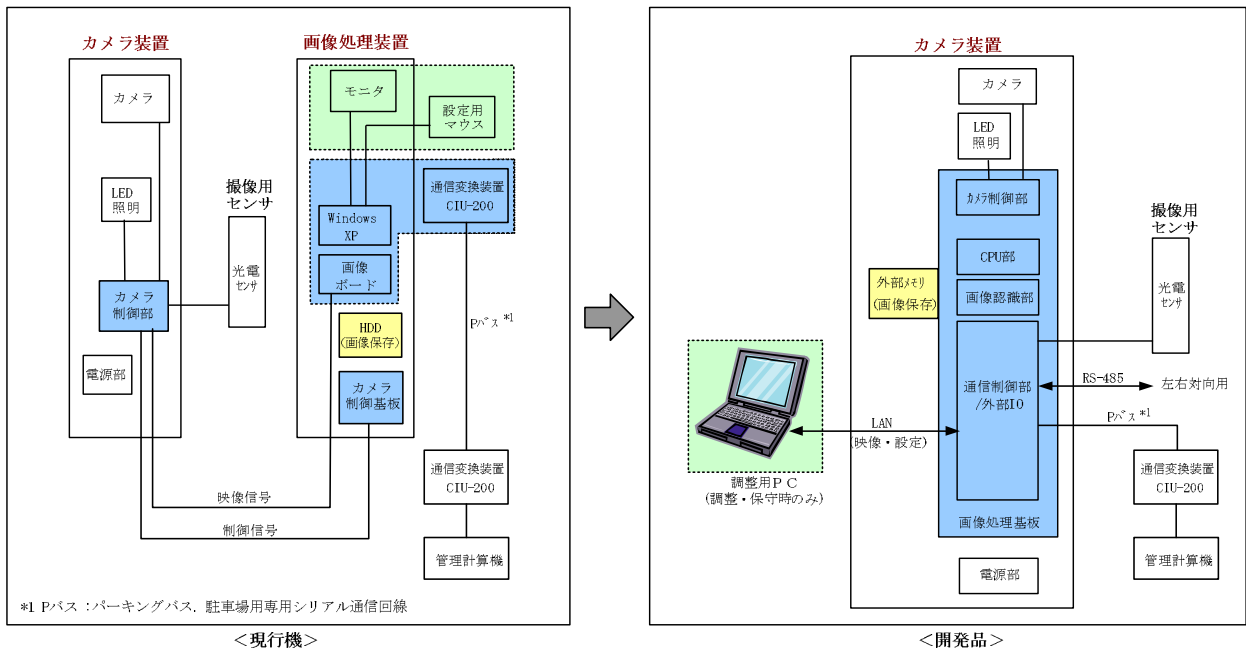


図2 機能ブロック図

物を含め、画像より複数箇所見つかる。以降の処理はそれら複数の候補に対して順に行われ、文字認識が成功した段階で打ち切られる。

(2) プレート画像の正規化

先に述べたように、通常は斜め横から撮影しているため、画像上でのナンバープレートは見かけ上変形している。この見かけの変形を戻して、仮想的に正面から撮影された画像に正規化する。

正規化は、例えばナンバープレートの4コーナーなど、特定の4つの特徴点が正確に検出できれば射影変換 [2] により簡単に行うことができる。しかし、実際にはナンバープレートの装飾品などによってその特徴点を正確に検出することは難しく、ここでは3つの代替処理によってプレート画像を正規化する (図5)。

① 回転補正

まず、プレート画像における文字列を水平に並べるための画像平面内の回転補正を行う。これは、一連番号に相当する領域を検出し、それらを結ぶ直線と水平線とのなす角を算出することで実現される。

② 斜形補正

次に、斜めに倒れた文字を垂直に戻す処理 (斜形補正と呼ぶ) を行う。図5に示すように、平行四辺形が長方形に補正される。これは、あらかじめ仮定した複数の角度にて斜形補正を試行し、その前後における文字領域の変形度から真の傾斜角を推定することで実現される。

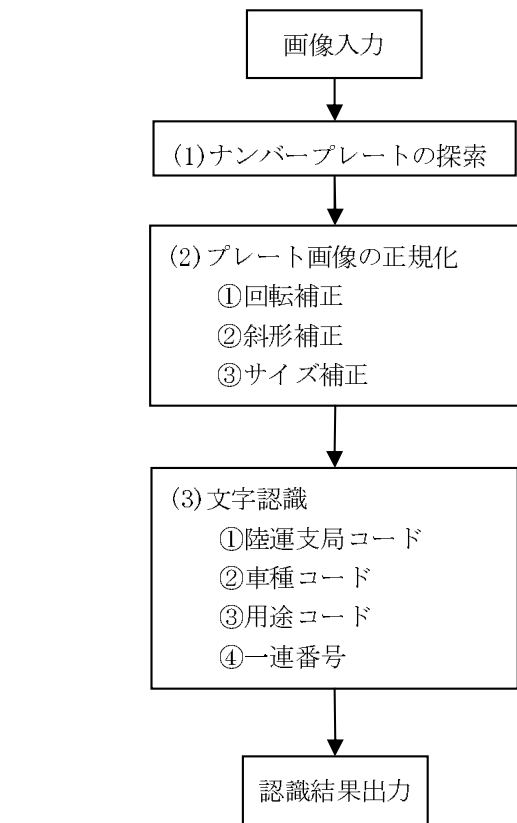


図3 ナンバープレート認識

③ サイズ補正

最後に、プレート画像を所定の大きさ、および、アスペクト比になるようにリサイズして正規化処理が完了する。

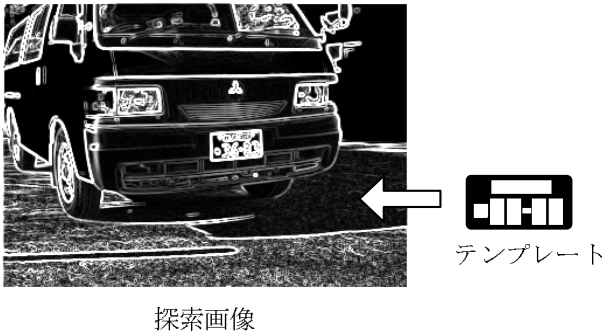


図4 テンプレートマッチング

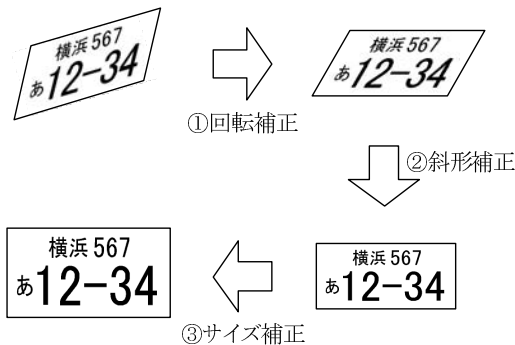


図5 プレート画像の正規化

(3) 文字認識

正規化されたプレート画像から陸運支局コード、車種コード、用途コード、一連番号、を認識する。これらの文字認識は、あらかじめ記憶している文字パターンとのテンプレートマッチングにより行われる。

3.2 プレート姿勢角に対する許容範囲の向上

新型車番認識システムでは、車両の多様な進入方向に対応するため、ナンバープレートの姿勢角に対する許容範囲を向上させた。以下では、その対策について述べる。

(1) 部分テンプレートマッチングによるプレート候補探索

ナンバープレートの姿勢角に対する許容範囲を向上させることは、画像上での見かけの変形に対する頑健性を強化させることにほかならない。そのためには、まず、変形補正前の処理であるナンバープレートの探索処理を強化する必要がある。

探索処理で用いているテンプレートマッチング手法は、特定のパターンを探索するための典型的な手法のひとつである。また、ナンバープレートの文字領域を塗り潰した簡易パターンとしてテンプレートを用意することにより、ある程度の見かけの変形にも耐えられるように設計されている。しかし、変形の度合いが進むと、類似度が下がり、探索に失敗する [3]。

新型のアルゴリズムでは、テンプレートを左右2つに分

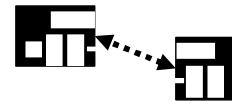


図6 弱結合した部分テンプレート

割し、2つの部分テンプレートの位置関係に適度な柔軟性を持たせることで多様な変形に対処している(図6)。部分テンプレートは弱く結合しているため、変形成分を吸収しつつも、矛盾した位置関係にはならないようになっている。マッチングは以下の手順にて行われる。

- ① 右側の部分テンプレートでマッチングを行い、類似度の高い候補位置を検出する。
- ② 候補位置の左側に、上下左右に所定の広がりを持った探索範囲を設け、左側の部分テンプレートでマッチングを行う。
- ③ 両者の類似度を積算し、閾値以上であれば、ナンバープレート候補とみなす。

(2) 回転補正角の推定

ナンバープレートの姿勢角に対する許容範囲を向上させるためのもう一つの対策として、変形補正処理そのものの強化を行っている。従来の回転補正処理では、プレート画像において予め決められた範囲に入る文字候補領域を抽出し、それらを結ぶ直線と水平線とのなす角により回転補正を行っていた。しかしながら、範囲が予め決まっているため、文字間の位置関係に強い制約が課せられ、変形が大きい場合には文字候補領域を正しく求めることができない。

そこで、文字候補領域の抽出をトップダウン的に行うのではなく、すべての候補を抽出した後、最適な組み合わせを求めるようボトムアップ的な処理に改めた。これにより、回転補正処理の変形に対する頑健性が向上する。具体的な処理手順は以下の通りである(図7)。

- ① プレート画像に対して、ラベリング処理を行い、連結領域(同図(b))を抽出する。
- ② 各領域について、その外接矩形の幅・高さ・アスペクト比に基づき、一連番号としての文字の候補を抽出する。このときドット(“・”)の可能性も考慮する(同図(c))。
- ③ 一連番号としての文字候補の組み合わせを決定する。下位の桁を仮決めし、隣接する上位の桁を検証して4桁が成立する組み合わせを求める。
- ④ 複数の組み合わせが得られた場合は、一連番号としての確度の高い組み合わせを抽出する(同図(d))。
- ⑤ 抽出した一連番号を結ぶ中心線(同図(e))と水平線とのなす角を算出する。

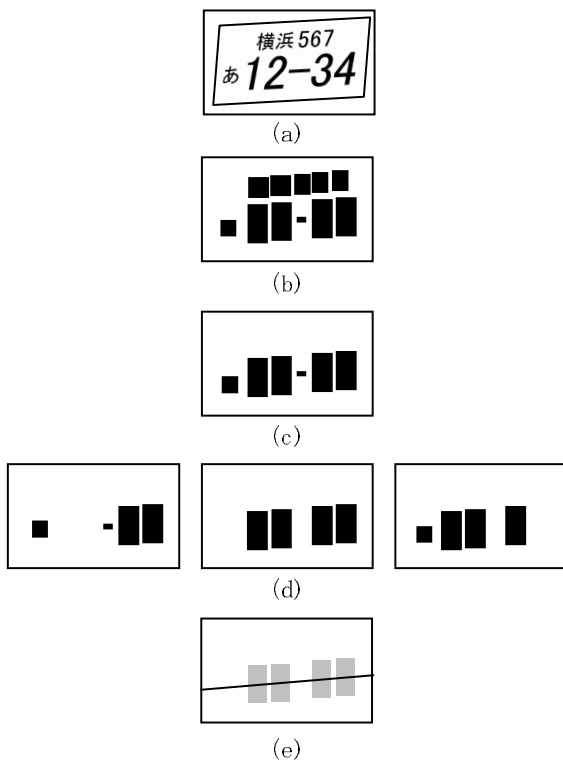


図 7 回転補正角の推定

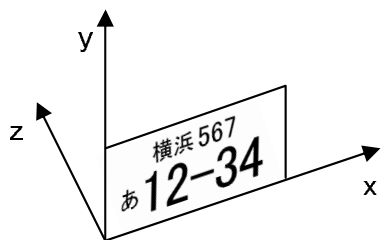


図 8 プレートの座標系

3.3 認識性能

新型アルゴリズムの性能を確認するため、検証実験を行っている。実験では、模擬ナンバープレート数十種類用意し、カメラに対して正対した状態を基準に、 x 軸周りの回転 ± 20 度、 y 軸周りの回転 ± 10 度、 z 軸周りの回転 ± 5 度の範囲で回転させたプレートを撮影した（図 8 参照）。これら画像に対する認識率は、旧型で 91 %、新型 99 % となっており、新型で向上していることを確認した。

4 むすび

本開発では、認識処理の専用ボード開発に伴い認識アルゴリズムの移植（パソコン上のライブラリを画像処理基板に移植）と同時に性能向上という課題があったが、当社蓄積技術を最大限に活用し、目的を達成した。

本開発にて当社の強みを更に強化し、駐車場事業を更に発展させていきたいと考える。

謝 辞

今回、開発者を代表するかたちで新型車番システムの紹介をしたが、本開発を達成できたのは、多くの方々のご尽力、ご協力のお陰である。本開発に関わったすべての皆様に深く感謝する。

参考文献

- [1] 高木幹雄, 下田陽久, "新編画像解析ハンドブック", 東京大学出版会, pp.1669-1727, 2004.
- [2] K. Kanatani, Statistical Optimization for Geometric Computation: Theory and Practice, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 1996; reprinted, Dover, New York, NY, U.S.A., 2005.
- [3] 黄瀬浩一, 大町真一郎, 内田誠一, 岩村雅一, "カメラを用いた文字認識・文書画像解析の現状と課題", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No. PRMU-742, pp.85-90, 2005.

[執筆者紹介]



館 和嘉 略歴

1995 年入社。以来、駐車場事業の機器開発、及びシステム設計に従事。現在、社会交通システム部システム課



関 真規人 略歴

2008 年入社。以来、画像認識技術とその応用センサの開発に従事。現在、開発部画像センサグループ

群集の三次元行動計測に基づく滞留検知センサ

関 真規人, 野口 真身, 木村 直哉, 市原 淑雄,
佐々木 秀一, 鈴木 暢夫, 伊藤 啓二

要旨： 公共スペースの安全・安心を提供する画像センサについて述べる．本センサは3台のカメラにて撮影された映像をリアルタイムに解析し、視野内に発生した混雑や滞留状態を発見する．3台のカメラを併用することにより、人の眼と同じ原理で三次元空間情報を知覚し、群集の密度や歩行速度を計測する．駅構内にて実施した検証実験では危険な混雑状態を正しく検知することができた．本センサはアナウンスによる注意喚起や安全システム制御のためのトリガとして利用される．

1 まえがき

イベント会場に向かう歩道橋などでは、群集が押し寄せることによってたびたび事故が起きている [1, 2, 3]．日常においても駅や商業施設の階段、エスカレータなどで危険な状態に遭遇することがある (図 1)．

こうした群集事故を未然に防止するためには、事前の周到な対策が必要である．ただし、それには限界があるため、加えて、事故発生前の予兆をリアルタイムに捉え、周囲への情報展開による自発的な抑止行動の誘発、分断規制などの強制的な軽減措置を行うことが重要となる．

予兆の捕捉方法としては、現在のところ監視員によるモニタリングが主流である．しかし、昨今では、負荷軽減や人員削減を目的に、監視員に代わり監視カメラの映像から群集の混雑状態を自動的に検知する手法やセンサとしての実用化が報告されつつある．それらは以下の2つに大別される [4]．

- 人を個別に検出し、監視エリアに存在する人数や歩行速度を直接計測する方法
- 画像特徴を解析し、何らかの相関関係に基づいて混雑指標へ換算する方法

前者は、画像から人物そのものや、顔、頭部といった特



図 1 混雑シーン

徴的な部位を検出することを基本としており、さまざまな方法が提案されている．例えば、予め学習された顔検出器を用いる方法 [5]、人の輪郭特徴に基づいて検出する方法 [6, 7, 8]、局所的な特徴点の移動軌跡情報をクラスタリングし、個々の人物を切り出す方法 [9, 10, 11, 12]、局所的な特徴抽出と大域的な処理の組み合わせで人物を検出する方法 [13] などがある．しかしながら、このようなセグメンテーションをとる方法は、人が密着するようなひどい混雑シーンには弱いという問題がある．

一方後者は、監視カメラにて撮影された映像を解析して、群集に相当する領域の大域的な特徴量から混雑状態を判断するものである．例えば、領域の総面積 [14, 15, 16]、特徴点の画素数 [4, 14, 15, 17]、エッジ勾配ヒストグラム [18]、フラクタル次元 [19] などの特徴量が計測され、群集の密度に換算される．また、画像上の各点における見掛けの移動量と方向を表すオプティカルフローを算出し、群集の歩行速度へ換算している方法もある [4]．これらの方法は、前者の方法に比べて混雑時への対応能力が高く、群集の状態を大まかに捉える場合には有効であるが、画像上の見かけの特徴量から換算するため正確性には欠ける．また、一般には1台のカメラで撮影された画像上の特徴を用いるため、照明変化等に左右されやすいという問題もある．

本稿で述べる画像センサは、監視エリアを3台のカメラで撮影し、人の眼と同じ原理で三次元空間情報を知覚して、直接的に群集の密度や歩行速度を計測する．そのため、監視エリア内に発生した混雑や、その中でも特にひどい状態である群集が立ち止まった滞留状態をそれぞれ正確に発見することができる．3台のカメラで捉えるため、照明変化等にも頑健である．

以下では、まず、本センサの概要を紹介する．そして、センサに搭載している混雑・滞留検知アルゴリズムについて述べる．最後に、実映像に対する実験結果を示して本センサの有効性を明らかにする．



図2 センサの外観

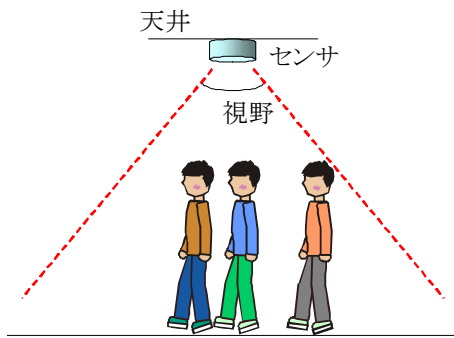


図3 センサの設置

2 センサ概要

図2に本センサの外観を示す．本センサは，3つの CCD カメラを搭載した画像撮影部と汎用マイコンによる画像処理部を一体化したコンパクトな構造となっている．3つの CCD カメラは1枚の基板上に少し離れて配置されており，視点の異なる3枚の画像が同時に撮影できるようになっている．また，汎用マイコンを搭載していることから，アプリケーションプログラムを変更することで他の用途にも流用可能である．実際に，当社では，同一の H/W を用いて，セキュリティ施設への不正侵入を防止するための共連れ検知センサや一方通行ゲートにおける逆流（侵入）を検知するセンサもすでに実用化している [20] ．

本センサは，天井やポールなどに取付けられ，群集を見下ろすように撮影することを前提としている．これは，人同士による隠蔽を少なくし，より高い検知精度を得ることを期待しているためである（図3）．

3 混雑・滞留検知アルゴリズム

3.1 三次元空間情報の抽出

前述の通り，本センサでは視点の異なる3枚の画像が同時に撮影される．この3枚の画像から視野内における三次元空間情報を抽出する．

複数台のカメラ画像から三次元空間情報を抽出する手法としては，古くより「ステレオ視」が知られている．これは三角測量の原理に基づいている．以下では説明を簡単にするために，焦点距離の等しいカメラ2台が，光軸が平行

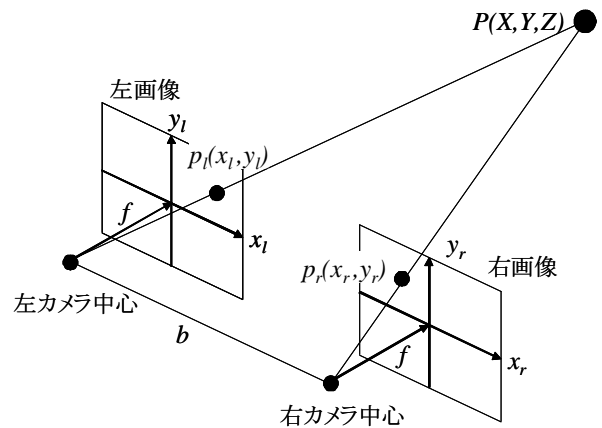


図4 ステレオ視の原理

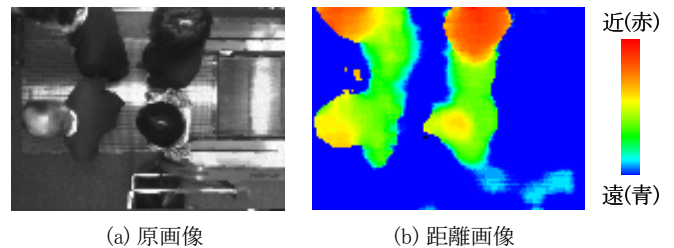


図5 三次元空間情報の抽出

で，かつ水平に設置されている場合について述べる．ここで，図4に示すように，空間中の点 $P(X, Y, Z)$ が各画像においてそれぞれ $p_l(x_l, y_l), p_r(x_r, y_r)$ として観測されたとすると，以下の関係式が成り立つ．

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d} \quad (1)$$

$$Y = \frac{b(y_l + y_r)}{2d} \quad (2)$$

$$Z = bf/d \quad (3)$$

ただし， f は焦点距離， b は基線長， d は視差 ($x_l - x_r$) である．したがって， f, b を既知とすると，点 $P(X, Y, Z)$ の画像間での対応点 $p_l(x_l, y_l), p_r(x_r, y_r)$ から，点 $P(X, Y, Z)$ の三次元位置が算出される．なお，画像間の対応点の探索にはブロックマッチング手法を用いる．この方法では，一方の画像中の各画素ごとに，その周辺の局所的なパターンを用いて，他方の画像から類似するパターンの位置を求めることで対応点を検出する．

対応点探索による三次元位置の算出をすべての画素に対して行うことで三次元空間情報をあらゆる距離画像が生成される．図5に距離画像の例を示す．図5(a)は原画像のひとつであり，同図(b)はそれに対する距離画像である．距離画像は，カメラから物体までの距離に応じた色で表示されている．

一般に，画像上のすべての画素で対応点を正しく求めることは非常に難しい．シーンによっては似たようなパター

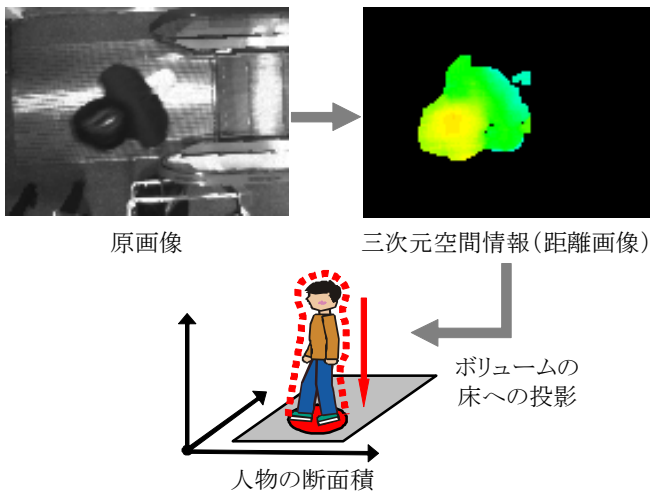


図6 密度の計測

ンが複数存在したり、正しい位置であっても視点の違いによる見え方やランダムノイズの影響により画像間で完全に一致することがないためである。

本センサでは、カメラを3台に増やすことで、シーンに関しての情報を十分に収集し、対応点の信頼度を向上させている。この3眼ステレオ視では、ひとつの基準カメラに対して、2組のステレオ画像対を形成し、それぞれのステレオ画像対から得られる結果を統合することで、対応誤りを軽減させることができる。

3.2 群集の密度と歩行速度の計測

(1) 密度計測

得られた三次元空間情報から群集の密度を計測する。これは次の手順により行われる(図6)。

- ① 視野内の所定の空間(検知エリアとして直方体の空間を設定)に存在する立体物を群集として抽出する
- ② 立体物の総断面積を求める
- ③ 検知エリアの断面積(底面の面積)に対する立体物の総断面積の密度を求める

立体物の抽出は、人の存在しない背景のみの三次元空間情報を用意しておき、背景の三次元空間情報と現在の三次元空間情報を比較することにより行う。なお、背景の三次元空間情報は、人が存在しない間に徐々に更新していく。

(2) 歩行速度計測

群集の歩行速度は、物体各点における三次元の動きベクトル^{*1}を求め、その移動量の平均値として算出する。そのために、まず、基準カメラ画像上でオプティカルフローを求める。オプティカルフローは、画像上の各点における見

^{*1} 厳密には鉛直方向成分を無視している。人物が水平な床面を歩行している場合、鉛直方向成分の移動量は小さいと考えられるためである。

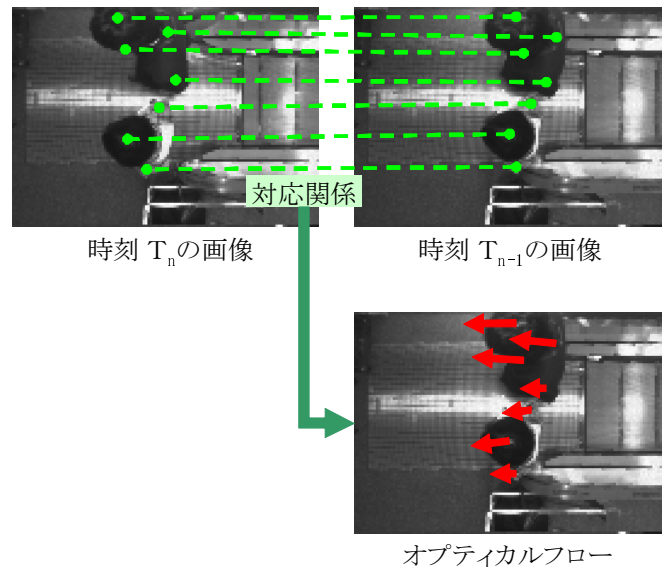


図7 オプティカルフローの算出

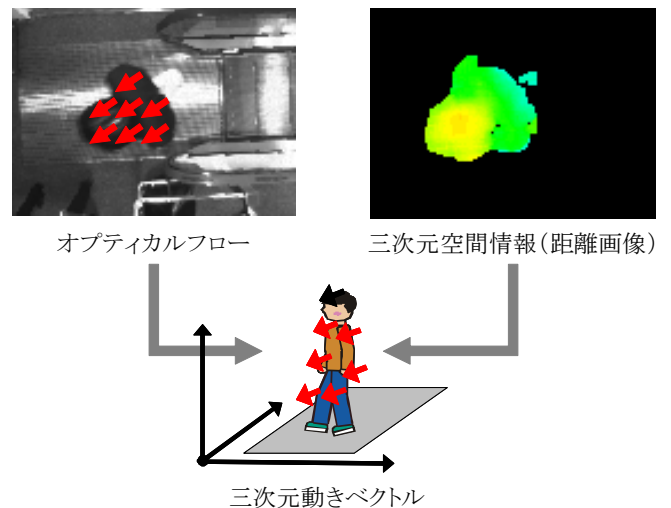


図8 歩行速度の計測

掛けの移動量と方向を表した移動ベクトルであり、時間的に連続した画像間の対応点を探索することで求められる。例えば、図7に示すように、時刻 T_n および T_{n-1} の画像において対応関係を求めると、その始点・終点座標値から移動ベクトルが求められる。

フローを計算する点は、あらかじめ画像中に離散的に配置され、立体物としてみなされた領域内に含まれる点として適応的に選ばれる。これは、計算時間を短縮するとともに、人物以外の背景物体の影響を軽減させるためでもある。

求められたオプティカルフローは、三次元の動きベクトルへ変換される(図8)。すでに画像上の各点に対応する空間の三次元情報が得られているため、その情報をもとに二次元から三次元への変換を行う。最後に、三次元の動きベクトルの平均移動量を求め、群集の歩行速度とする。

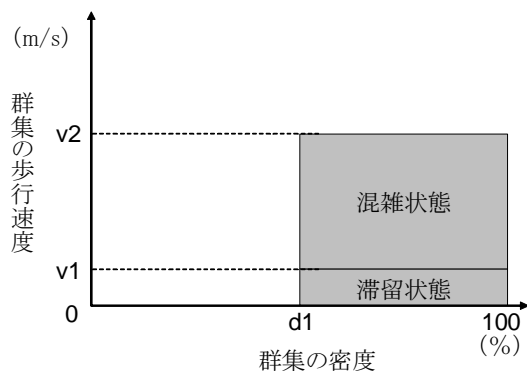


図9 混雑・滞留状態の判定基準

表1 検知された混雑状態

No.	状況
1	ベビーカーを押した人が降り口で方向転換したために、後続利用者が詰まり、混雑した。
2	杖をついた足の不自由な方が降りる際に時間を要し、後続利用者が詰まり、混雑した。
3,4,5	電車から下りた乗客が殺到し、混雑した。

3.3 混雑・滞留状態の判定

計測された群集の密度と歩行速度から混雑や滞留状態を推定する。ここでは、図9に示すように、密度と歩行速度の2次元マップにおいて、混雑状態と滞留状態を定義している。具体的には、密度 d_1 %以上、かつ、歩行速度が $v_1 \sim v_2$ m/s の状態を混雑状態とし、密度 d_1 %以上、かつ、歩行速度が v_1 m/s 以下の状態を滞留状態としている。いずれも、人が多く、動きが遅いことを想定している。

4 実験

本センサの有効性を確認するため、検証実験を行った。実験では、12名の人物により混雑状態および滞留状態を意図的に発生させ、センサの検知性能を確認した。結果として、各20回の試行に対し、混雑状態・滞留状態ともに100%検知することができた。

また、実環境下での実験も行っている。一例としては、某駅の上りエスカレータの降り口にセンサを設置し、土・日曜をまたいで4日間(7時から23時まで)センサを稼働させたことがある。その間、延べ131,918人の通行があり、センサは5回の混雑状態を検知した。検知した状況を表1に示す。これを見ると、混雑状態として妥当な状況が検知されていることが分かる。

5 むすび

本稿では、公共スペースの安全・安心を提供する画像センサとして、群集の三次元行動計測に基づく滞留検知センサについて述べた。本センサは3台のカメラにて撮影された映像をリアルタイムに解析し、視野内に発生した混雑や滞留状態を発見する。某駅にて実施した実験では、延べ131,918人が通行する間に5回の混雑状態を正しく検知することができ、有効性が確認できた。今後は、さらなる性能向上や、応用アプリケーションの開発について検討する予定である。

謝辞

多大なるご協力を頂きました関係者各位、日頃より貴重なご意見を頂きましたお客様各位に深く感謝致します。

参考文献

- [1] "第 32 回明石市民夏まつりにおける花火大会事故調査報告書", 2002.
- [2] "東京ビッグサイトにおけるエスカレーターでの事故発生について", <http://www.bigsight.jp/topics/press080804.pdf>, 2008.
- [3] "名古屋市交通局久屋大通駅におけるエスカレーター事故とその対応について", http://www.mlit.go.jp/report/press/tetsudo09_hh_000006.html, 2008.
- [4] 渡邊 清高, 羽下 哲司, "映像監視による群集監視システム", 画像センシングシンポジウム SSII, No.IN2-18, 2008.
- [5] S.-F. Lin, J.-Y. Chen, H.-X. Chao, "Estimation of number of people in crowded scenes using perspective transformation", *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol.31, No.6, pp.645-654, 2001.
- [6] B. Wu and R. Nevatia, "Detection of multiple, partially occluded humans in a single image by bayesian combination of edgelet part detectors", *ICCV*, Vol.1, pp.90-97, 2005.
- [7] T. Zhao and R. Nevatia, "Bayesian human segmentation in crowded situations", *CVPR*, Vol.2, pp.459-466, 2003.
- [8] M. R. Sullivan and M. Shah, "Detecting and Segmenting Humans in Crowded Scenes", *ACM Multimedia Conference*, 2007.
- [9] D. Biliotti, G. Antonini, J. P. Thiran, "Multi-layer hierarchical clustering of pedestrian trajectories for automatic counting of people in video sequences", *Proc. IEEE Workshop on Motion and Video Computing*, 2005.
- [10] V. Rabaud and S. Belongie, "Counting Crowded Moving Objects", *IEEE CVPR*, Vol.1, pp.705-711, 2006.
- [11] G. J. Brostow and R. Cipolla, "Unsupervised bayesian detection of independent motion in crowds", *CVPR*, Vol.1, pp.594-601, 2006.
- [12] A.M. Cheriyyadat, B.L. Bhaduri and R.J. Radke, "Detecting Multiple Moving Objects in Crowded Environments with Coherent Motion Regions", *IEEE Computer Society Workshop on Perceptual Organization in Computer Vision*, 2008.
- [13] B. Leibe, E. Seemann and B. Schiele, "Pedestrian detection in crowded scenes", *CVPR*, Vol.1, pp. 875-885, 2005.
- [14] A. C. Davies, J. H. Yin and S. A. Velastin, "Crowd monitoring using image processing", *Electron. Commun. Eng. J.*, Vol.7 pp.37-47, 1995.
- [15] S.-Y. Cho, T. W. S. Chow and C.-T. Leung, "A neural-based crowd estimation by hybrid global learning algorithm", *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. B*, Vol.29, pp.535-541, 1999.
- [16] N. Paragios and V. Ramesh, "A mrf-based approach for real-time subway monitoring", *CVPR*, Vol.1, pp.1034-1040, 2001.
- [17] C. S. Regazzoni and A. Tesei, "Distributed data fusion for real-time crowding estimation", *Signal Process.*, vol. 53, pp. 47.63, 1996.
- [18] D. Kong, D. Gray and H. Tao, "A Viewpoint Invariant Approach for Crowd Counting", *IEE Int. Conf. on Pattern Recognition*, Vol.3, pp.1187-1190, 2006.
- [19] A. N. Marana, L. F. Costa, R. A. Lotufo, "Estimating crowd density with Minkowski fractal dimension", *Proc. IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol.6, pp.3521-3524, 1999.
- [20] "人物検知センサ", *三菱プレジジョン技報*, Vol.3, pp.19, 2008.

[執筆者紹介]



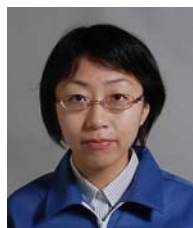
関 真規人 略歴

2008 年入社。画像認識技術とその応用センサの開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ



佐々木 秀一 略歴

1985 年入社。航空機搭載電子機器、レーダ信号処理装置、障害者支援機器、トーキングサイン等の設計・開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ



野口 真身 略歴

2007 年入社。人物検知センサの開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ



鈴木 暢夫 略歴

1977 年入社。交通管制諸機器の設計を経て、超音波式、ループコイル式の車両感知器の開発に従事。現在、社会・交通システム部



木村 直哉 略歴

1990 年入社。低価格ビジュアル、パッシブレンジセンサ、戦術用画像処理装置の開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ



伊藤 啓二 略歴

1985 年入社。航空機搭載電子機器、障害者支援機器、トーキングサイン等の設計・開発に従事。現在、社会交通システム部社会システム技術課



市原 淑雄 略歴

1988 年入社。画像発生装置ハードウェア開発および画像処理装置ハードウェア開発に従事。現在、技術開発部画像センサグループ

高速回転ホイールの性能向上

谷口 典史，田邊 和久，梶田 直希，田島 崇男

要旨： ホイールは人工衛星に搭載され、ホイールを加減速することにより、人工衛星の姿勢を制御する機器である。3軸制御するために、通常3個以上のホイールを衛星に搭載する。また、ホイールが角運動量を蓄積することにより、人工衛星の姿勢の安定化を行う働きもある。当社の0.1Nm出力タイプ的高速回転ホイール(HSRW)は、製品化され商用システムに適用中である。本ホイールはロータの高速化、駆動回路一体型を図り、かつ低擾乱要求にも対応可能な優れた性能を持つホイールである。衛星システムからホイールへの性能向上要求は年々高まっている。これに応えるべく更なる性能向上を図るため、出力トルクの向上に主眼を置いた新ホイールの開発を行った。

1 まえがき

衛星用ホイールに要求される主要性能項目は、角運動量、出力トルク、擾乱性能、消費電力、耐振性、質量である。これらの要求に対して、当社はロータの高速化による角運動量の増大、ロータインバランスの最小化及びベアリングの小型化による擾乱性能の向上、モータ及びベアリングのロストルク最小化による消費電力の低減等、要求される性能を満足する高速回転ホイールを衛星システムに提供してきた。

近年の衛星システムにおいて高出力トルク化の要求が高まっており、現状の高速回転ホイールでは要求される性能を満足することが困難な状況となりつつある。

そこで、開発目標値を国内及び国外の要求仕様を包含するレベルに設定し、表1に示す出力トルク、耐環境性、角運動量、質量の目標値を設定した。

本論文では、(1)高出力トルク化(2)耐振性向上(3)質量低減のための設計結果と、これに基づき試作した開発モデルの試験結果について報告する。

表1 開発目標

No	項目	開発目標
1	出力トルク	0.4 Nm 以上 @2000 rpm 0.3 Nm 以上 @3500 rpm 0.2 Nm 以上 @6000 rpm
2	耐環境性 (ランダム)	18.3 Grms (0.23 G ² /Hz)
3	角運動量	80Nms
4	質量	11.6 kg 以下

2 ホイールの概要

高速回転ホイール性能向上型(HSRW性能向上型)の外観を図1に示す。

ホイールの機能は、衛星の姿勢制御に資するため、姿勢制御系から制御トルク信号を受け取り、この信号に従って、姿勢制御のためのトルクを発生すること、ホイールの回転数を制御することにより回転数に比例した角運動量を蓄積することである。

また、姿勢制御系のために、ホイールの回転数に比例したタコパルス信号及び回転方向信号を出力する。ホイールの簡略化した構成を図2に示す。ホイールは、ローターティ



図1 高速回転ホイール 80Nms タイプ (HSRW L80)

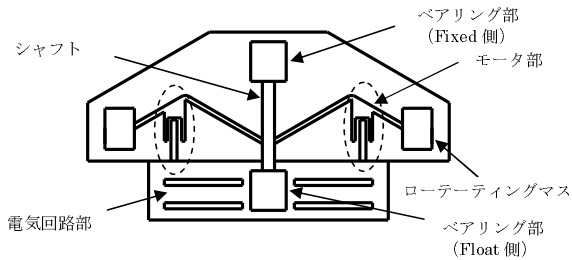


図2 ホイール簡略図

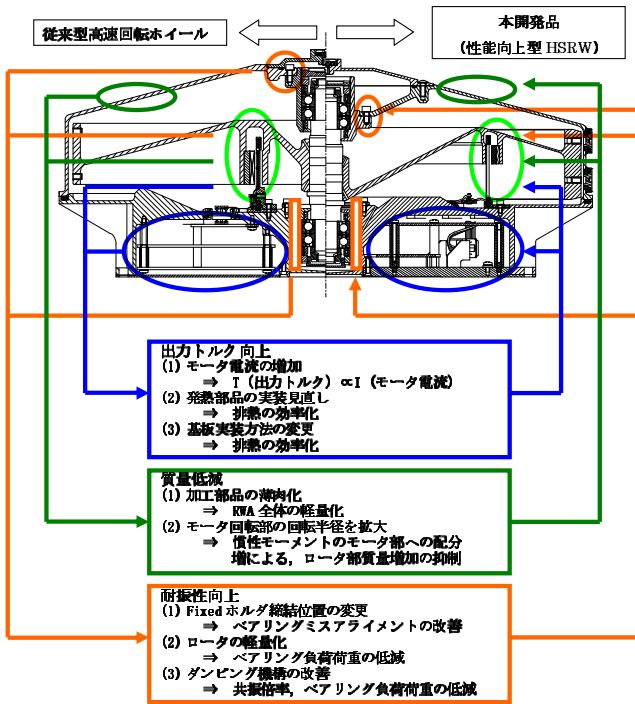


図3 変更点

ングマス、ベアリング部、モータ部、ハウジング部、電気回路部（DC/DCコンバータ、I/Oインタフェース、モータ電流コントロール）から構成される。

3 変更点

従来型高速回転ホイールから、本開発品（性能向上型 HSRW）への主な変更点を図3に示す。

3.1 高出力トルク化

開発モデルは、従来モデルの0.1Nm(@2000rpm)に対し、最大0.4Nm(@2000rpm)と4倍の出力トルクを目標としている。従来モデルのモータでは、4倍の出力トルクを得るには、単純計算で、モータのステータコイルに4倍の電流を流す必要がある。

単純に電流のみを大きくした場合、モータの駆動回路の駆動能力、ステータコイルの発熱が問題となる。発熱の問題を回避するには、廃熱経路（ステータコイルから、ホイール底面間）の熱抵抗を小さくするとともに、モータ電流の増加を抑える等の対策が必要となる。

廃熱経路の熱抵抗を小さくするには、通常、廃熱経路の部材を厚くする等の対策を採るが、質量の増加を招く傾向にある。本ホイールでは、モータ半径を約2倍にすることで質量の増加をおさえつつ

- ・ ステータコイル部の廃熱経路の断面積を2倍にすること。
- ・ 最終的な廃熱ポイントとなるホイール底面までの距離を短くすること。

で廃熱経路の熱抵抗を下げることにした。

モータ電流 (I_m) の増加を抑えるための検討は、モータ駆動回路の設計を極力変更しないことを条件に進めた。モータの出力トルク (T) が一般に (1) に示す式で表されることから、コイル部磁束密度 (B) を向上させることで対応した。

$$T = T_{sf} \times I_m = (k \times B \times L \times n \times r) \times I_m \quad (1)$$

T : 出力トルク (Nm)

T_{sf} : トルクスケールファクタ (Nm/A)

I_m : モータ電流 (A)

K : 定数

B : ギャップ磁束密度 (T)

L : 有効磁石長 (mm)

n : ステータ巻数 (ターン)

r : モータ半径 (mm)

磁石、磁気回路の検討、解析を、後述する質量低減のための検討と合わせて行い、コイル部磁束密度 (B) を、従来の約1.4倍 (T_{sf} が約1.4倍になる) にすることができ、この結果、約3倍のモータ電流 (I_m) で4倍の出力トルクを実現した。

質量低減のための検討ではモータ半径 (r) を約2倍にし、有効磁石長を1/2にすることにより、

- ・ モータのロータ側質量のロータ慣性モーメントに寄与する割合が従来より大きくなり、軽量化が図れる。
- ・ (1)式よりモータの出力トルク (T) が約2倍になるが、モータ電流が3倍程度であれば、モータ駆動回路の設計を大きく変更する必要がないこと等を考慮し有効磁石長 (L) を従来の半分にし、ロータ全体の慣性モーメントを維持しつつロータ部の軽量化を図った。

この結果、モータ半径を約2倍にすることにより、ロータ質量で約450gの軽量化を行うことができた。また、ロータの軽量化により耐機械環境性能の向上も図ることが出来た。

以上の検討の他に、(1)式のステータコイル巻数 (n)、ワイヤ径等ステータコイルの発熱を抑えるための詳細な検討を合わせて行い、同時に軽量化を実現する最適値を算出した。

これらの設計変更に対する検討結果を反映した、磁界解析及び熱解析を実施し、設計の妥当性を評価した。以下に解析結果を示す。

(1) モータの磁界解析

選定したコイル、マグネット等のパラメータを入力した2次元1/4モデルの解析を実施し、出力トルク、トルクスケールファクタ、磁束密度等の評価を行った。図4にシ

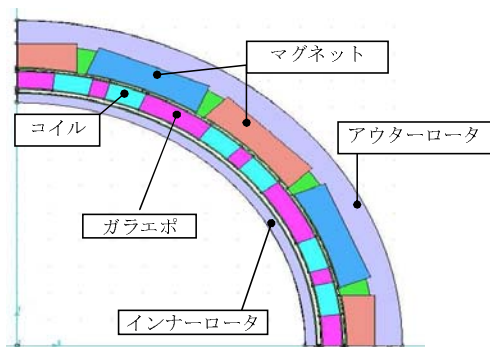


図4 二次元磁界シミュレーションモデル

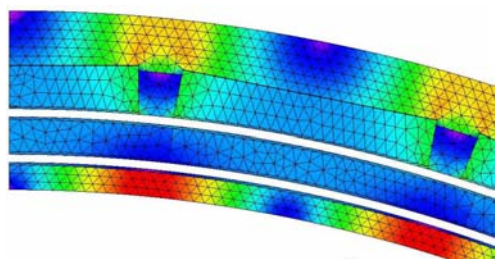


図5 磁束密度解析結果 (一部拡大表示)

シミュレーションモデルを示す。

解析結果の一例として磁束密度分布の結果を図5に示す。表示されている赤色が磁束密度の強い部分であり、磁束密度等のパラメータを評価することが可能である。

各パラメータを微調整しながら磁束密度やトルクスケールファクタ等の結果が設計目標値（設計パラメータ）と一致するようにシミュレーションを行う。

シミュレーションにより得られたスケールファクタと、完成後の製品にて確認したスケールファクタの測定結果を表2に示す。

スケールファクタについては設計目標値に対して-1%程度と非常に高い精度で開発モデルを製作することができた。

出力トルクにおいては、目標とする 0.4Nm 以上 @2000rpm を満足する出力トルク得ることができた。(詳細は4項 試験結果を参照)

(2) 熱解析

本開発品（性能向上型 HSRW）の熱数学モデルを図6に示す。各熱抵抗 R は、(2)、(3)の記計算式を用いて [1]、算出した。

表2 設計値と実測値の比較

T_{sf} 設計値 (シミュレーション結果)	0.080 [Nm/A]
T_{sf} 実測値	0.079[Nm/A]
精度	-1.2 [%]

$$R = \frac{L}{\lambda \cdot A \text{ or } A_{lm}} \quad (2)$$

$$A_{lm} = \frac{A_{out} - A_{in}}{\log_e(A_{out}/A_{in})} \quad (3)$$

L : 伝導長 (m)

λ : 熱伝導率 (W/mK)

A : 伝導面積 (m²)

A_{lm} : 円筒壁の平均接触面積 (m²)

A_{out} : 外径表面積 (m²)

A_{in} : 内径表面積 (m²)

解析条件は、温度規定点: +70℃, 発熱条件: 最大加速/最大減速ケースとして、クリティカル部品であるモータ部(コイル)、電気回路部、ベアリング部の過渡応答熱解析を実施した。解析結果を図7~9に示す。各クリティカル部品が、許容温度以下であることを確認し、設計変更の妥当性を確認した。

3.2 質量低減

質量低減は、加工部品の薄肉化によりホイール全体の軽量化を図った。また、モータ半径を拡大することで、慣性モーメントのモータ部への配分増加により、ロータ部質量

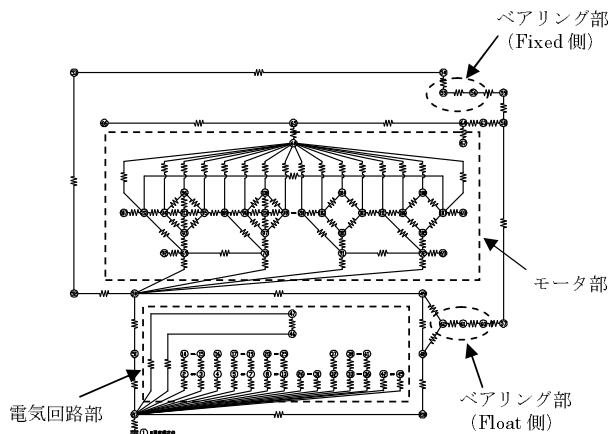


図6 熱数学モデル

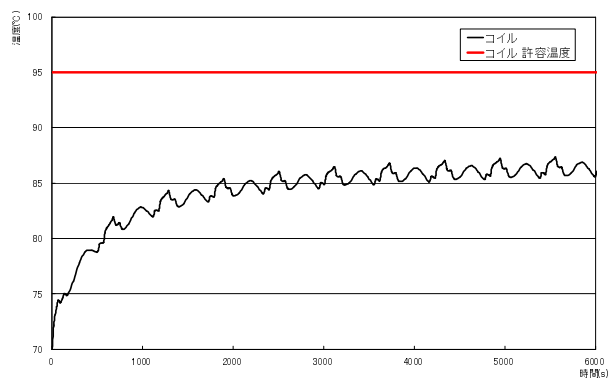


図7 モータ部(コイル)温度

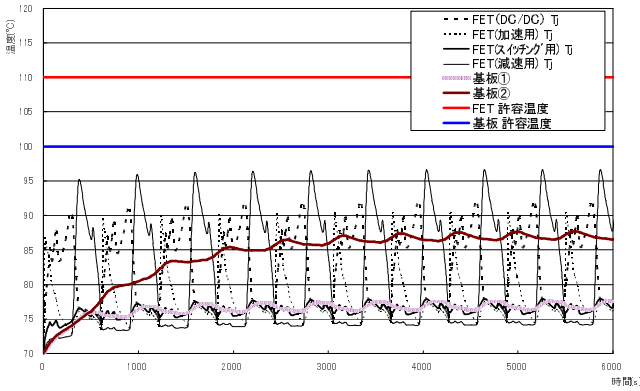


図 8 電気回路部温度

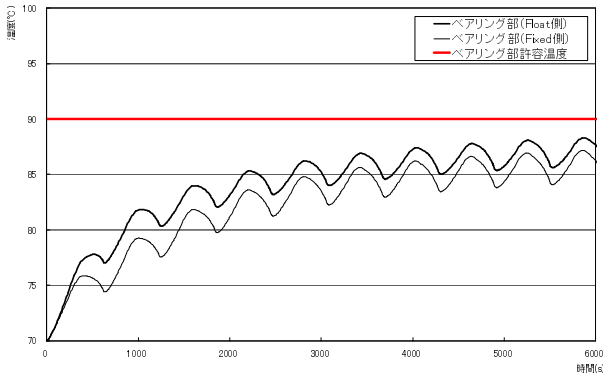


図 9 ベアリング部温度

増加の抑制をし、全体質量の低減を実現した。ホイールモデリング概要を図 10、質量解析結果を表 3 に示す。

本開発品（性能向上型 HSRW）が、目標値 11.6kg 以下を満足しており、設計変更の妥当性を確認した。

3.3 耐振性向上

耐振性向上は、Fixed ホルダ締結位置を変更することで、振動印加中のベアリングミスアライメントを改善すること、及びロータの軽量化、形状の最適化を実施することで、Fixed, Float 側のベアリング負荷荷重の低減、均等化を実現した。また、ダンピング機構の改善により、共振倍率の

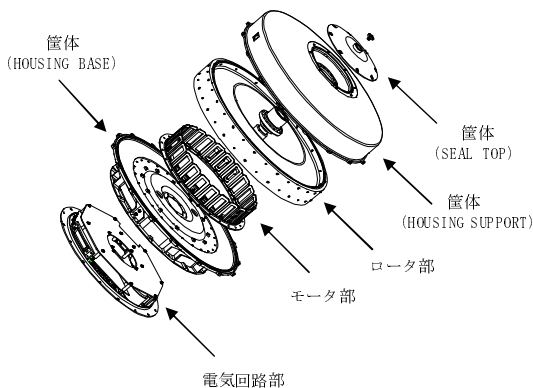


図 10 ホイールモデリング概要

表 3 質量解析結果

部 位	従来型 高速回転 ホイール	本開発品 性能向上型 HSRW	備 考
ロータ部	7.5 kg	6.2 kg	
モータ部	0.2 kg	0.4 kg	
電気回路部	1.2 kg	1.5 kg	
筐体	3.6 kg	3.1 kg	
TOTAL	12.5 kg	11.2 kg	目標 11.6 kg 以下

低減を図った。

なお、筐体のリップを最適位置に配置することにより、筐体の質量増加及び、加工部品の薄肉化による剛性低下を極力抑えつつ、質量低減及び耐振性向上の両立を図った。

構造解析は、有限要素法プログラムを用いた解析ソフトである NASTRAN (NASA Structural Analysis Program) を使用し、構造数学モデルを作成した。構造数学モデルを図 11 に示す。作成した構造数学モデルを用いて、固有値解析及び周波数応答解析、静解析を実施した。

(1) 固有値解析

固有値解析は、ホイールの 1 次固有振動数が、衛星搭載機器の一般要求である 120Hz 以上の剛性を有することを確認する目的で実施した。また、ベアリング部のクリティカルな振動数を把握する目的で実施した、固有値解析の結果を図 12, 13 に示す。ホイールの面外及び面内方向の 1 次固有振動は、123.6Hz となり、120Hz 以上を満足した。

(2) 周波数応答解析

周波数応答解析は、振動印加時におけるベアリング負荷荷重及びベアリングミスアライメントを確認する目的で実施した。解析の結果、ベアリング負荷荷重が、ベアリング許容荷重を下回ることで、及びベアリングミスアライメントが設計許容値以内であることを確認した。

(3) 静解析

静解析は、振動印加時における筐体の応力及び変位を確認する目的で実施した。ロータ部は、真空状態であり、地

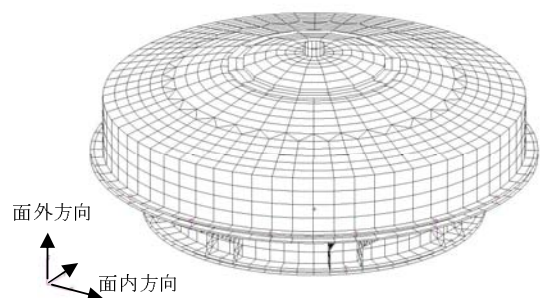


図 11 構造数学モデル

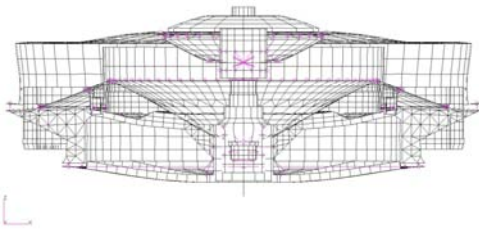


図 12 面外方向一次固有振動数 (123.6Hz)

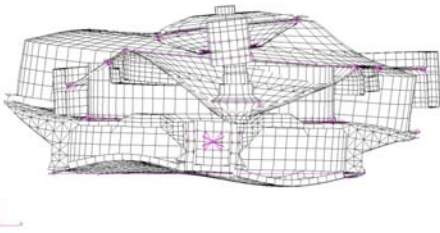


図 13 面内方向一次固有振動数 (280.2Hz)

上における試験では筐体には常に外気圧が負荷される．振動印加時は，外気圧 + 加速度による応力が発生する．応力が素材の 0.2% 耐力以下であることを確認し，永久ひずみが生じないことを確認した．また，振動印加時におけるロータ部と筐体の変位を確認し，適切なクリアランスを確保していることを確認した．解析結果を表 4 に示す．

振動印加時の応力及び変位が，設計許容値以内であることを確認した．

一般的に静解析は， $9.8m/s^2(1G)$ の応力を振動印加時の最大加速度の積によって算出する．振動印加時の最大加速

度 G_{max} は式 (4) で評価される [2] ．

$$G_{max} = 3 \times \sqrt{\frac{\pi \cdot f_n \cdot Q \cdot PSD}{2}} \quad (4)$$

f_n : 固有振動数 (Hz)

Q : 共振倍率

PSD : 加速度密度 (G^2/Hz)

4 試験結果

開発試験結果と目標値の対比を表 5 に示す．開発試験結果は，開発目標値を十分満足しており，設計・製造および試験の妥当性を確認することができた．

今後，更なる耐環境性向上のために，JAXA 研究開発本部殿の協力を頂いて，より信頼性の高いホイールとするた

表 4 静解析結果

項目	構成品	振動印加時の応力及び変位	備考
応力	SEAL TOP	101.8 MPa	0.2% 耐力 240 MPa
	HOUSING SUPPORT	199.2 MPa	
	HOUSING BASE	170.5 MPa	
変位	HOUSING SUPPORT	2.52 mm	変位 3 mm
	HOUSING BASE	1.37 mm	
	ロータ部	2.91 mm	

表 5 性能向上型 HSRW の主要性能の試験結果

No	項目	開発目標値	試験結果
1	回転数	6000rpm	同左
2	角運動量	80Nm·s	同左
3	出力トルク	0.2Nm 以上@6000rpm 0.3Nm 以上@3500rpm 0.4Nm 以上@2000rpm	0.220Nm (Min) 0.326Nm (Min) 0.446Nm (Min)
4	消費電力	270W 以下@6000rpm(0.2Nm 出力時)	231.7W (Max)
5	ロストルク	0.04Nm 以下	0.0340Nm (Max)
6	BUS 電圧	30 ~ 52V	同左
7	外形寸法	Φ365mm × 150mm 以下	Φ364.6mm × 145.05mm
8	耐環境性 (ランダム)	18.3Grms(0.23G ² /Hz)	同左
9	衝撃	2000Gsrs	同左
10	一次固有振動数	120Hz 以上	123.6Hz
11	動作温度範囲	-20 ~ +70	同左
12	EMC 試験	MIL-STD-461C	同左
13	質量	11.6kg 以下	11.12kg

め詳細な構造解析作業を実施する。

5 むすび

衛星におけるホイール性能は、衛星の多様化に伴い、より高い性能が要求されてきている。本研究は、最近の衛星システム要求を満足できる性能を開発目標とし、出力トルク、耐振性、質量について性能向上を図った。

開発を通し、設計解析及び試験にて開発目標を達成していることを確認した。また、擾乱性能、EMC 特性についても従来の高速回転ホイールと同等の性能を有していることを確認した。

今後は、さらなる性能向上を目指すとともに、高信頼性のホイールを衛星メーカーに提供していく。

謝辞

本研究をご支援して頂いた方々、ならびに研究協力を頂いた宇宙航空研究開発機構 研究開発本部殿及び、三菱電機 先端技術総合研究所殿の関係者の方々に、この場を借りて感謝いたします。

参考文献

- [1] DAVE S.STEINBERG, “電子装置の冷却技術実用マニュアル”, ジャテック出版, 1989
- [2] “JERG-2-005:人工衛星機械設計基準”, JAXA 基準書

[執筆者紹介]



谷口 典史 略歴

1989 年入社，衛星搭載機器の電気設計及び品質管理を経て，リアクションホイール設計に従事．現在，宇宙機器部将来 FWA プロジェクトグループ



田邊 和久 略歴

1999 年入社，電子精密機器部の品質管理を経て，リアクションホイール設計及び試験装置等の開発に従事．現在，宇宙機器部将来 FWA プロジェクトグループ



梶田 直希 略歴

1991 年入社，ロケット搭載機器及び衛星搭載機器の品質管理を経て，姿勢制御用機器及び慣性センサの潤滑設計・機構設計に従事．現在，宇宙機器部機械技術課



田島 崇男 略歴

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

MEMS INS/GPS/VMS 複合システムの開発 タイトカップリング方式とロバスト制御

倉金 徹

要旨： MEMS センサを使用した汎用的な INS/GPS/VMS[‡]複合システムでは、最低 4 個の GPS 衛星を捕捉する必要があり、捕捉衛星数が減少した場合に精度を維持することが困難である。また、十分な数の GPS 衛星を捕捉している場合でも、マルチパスに代表される GPS 信号の劣化によって、INS の精度を悪化させることもある。当社ではこの問題を解決するため、GPS 衛星の生データを使用したタイトカップリング方式の INS を開発した。本論文では、開発した製品の概要、特徴、およびアルゴリズムを述べる。最後にフィールド試験の結果について説明し、GPS 衛星が減少した環境でも、INS の精度劣化が抑制できることを述べる。

1 まえがき

当社は、陸上用の慣性航法装置として高精度のジャイロと加速度計を使用した INS を長年製造している。この高精度 INS による慣性航法を行った場合、INS の誤差は短時間の運用では大きくならないため、問題にならないことが多い。しかし、長時間の運用を考慮した場合は僅かなセンサの誤差によって徐々に劣化していく INS の性能を何らかの手段によって推定し補正する必要がある。そのため、従来より用いられてきた手法として VMS の車速データを用いた INS/VMS 複合航法を行い、性能の劣化を抑制してきた。

一方で、近年の半導体技術を応用した MEMS センサの台頭によって、MEMS を使用した INS/VMS 複合システムの開発にも道が開けることになった。しかし、MEMS INS は安価ではあるが、性能は高精度 INS に比べて大きな差異があるため、VMS のみの複合航法では MEMS INS の性能劣化を完全に抑制することはできない。そこで、GPS を使用した INS/GPS/VMS 複合システム (以下、「IGV」と呼ぶ) を開発し、この問題を解決することにした。

ただし、GPS に関してはユーザの位置や速度を簡単に知ることができる反面、天空上の可視衛星を使用する理由から、電波の遮断やジャミングされやすい等の様々な問題が欠点として挙げられる。この欠点に対応するため、GPS ハイブリッド方式には GPS 受信機の位置や速度を利用せずに、GPS 生データを利用するタイトカップリング方式を採用した。生データを利用することによって、INS は GPS 受信機の捕捉衛星単位の信号情報を利用でき、ロバスト制御型のハイブリッドが可能になる。これによって、GPS 衛星減少時にもハイブリッドの継続が可能になり、MEMS INS の使用用途や使用環境を大きく拡大する見通しができた。

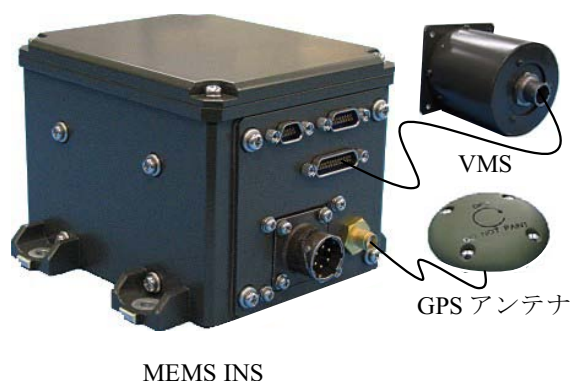


図 1 MEMS IGV 外観：MEMS INS は最大寸法が約 10cm 程度の小型の慣性航法装置で、手のひらサイズの大きさである。GPS 受信機を内蔵している。

2 製品の概要

IGV は、図 1 に示すように、15cm 四方のスペースに取付けることができる超小型のユニットである。GPS 受信機を内蔵しており、外部に VMS と GPS アンテナを接続することによってシステムが構成される。VMS が利用できない場合は、車速データをシリアルデータで入力するように変更できる。

また、ハードウェアの構成は図 2 に示すように、3 個の MEMS ジャイロと加速度計、GPS 受信機、A/D 変換器、および演算部で構成されている。

センサデータは、1kHz で A/D 変換された後に、演算部に取り込まれて積分処理される。GPS/VMS データはセンサデータの取得と同時に演算部に取り込まれる。演算部では 100Hz で SD^{*1}計算や航法計算を実施し、5Hz で GPS/VMS ハイブリッド計算を実施している。表 1 に IGV の代表的な諸元を示す。

* INS：Inertial Navigation System，慣性航法システム
† GPS：Global Positioning System，全地球測位システム
‡ VMS：Vehicle Motion Sensor，車速パルスが発生する装置

*1 SD：strapdown，機体座標系の角速度と加速度から航法座標系の角度や速度変化量を求めて水平を保つ機能

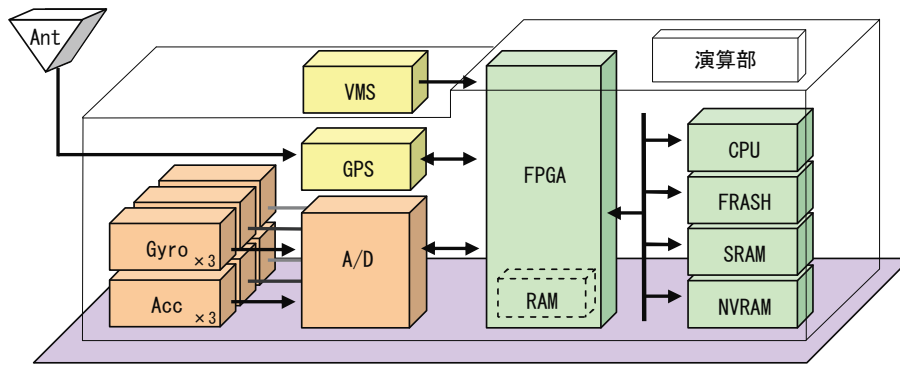


図2 ハードウェア構成

表1 主要諸元 (GPS アンテナ, VMS は含まない)

項目	内容	
寸法・質量	寸法 ^{*a}	84(W)×102(D)×76(H)[mm]
	質量	< 1 [kg]
性能 ^{*b}	位置	< 10 [m rms]
	速度	< 0.5 [m/s rms]
	姿勢角	< 0.5 [° rms]
	方位角	< 0.5 [° rms]
シリアル インターフェース	通信方式	RS-422
	転送方式	HDLC 準拠
GPS インターフェース	供給電源	DC5 [V]
	RF 入力	L1 C/A コード
VMS インターフェース	供給電源	DC5 [V]
	通信方式	RS-422
入力電源	電圧	DC18-32 [V]
	消費電力	< 15 [W]

^{*a} 寸法は突起物を含まない

^{*b} GPS 衛星を 4 個以上捕捉し衛星配置が良好な場合の性能

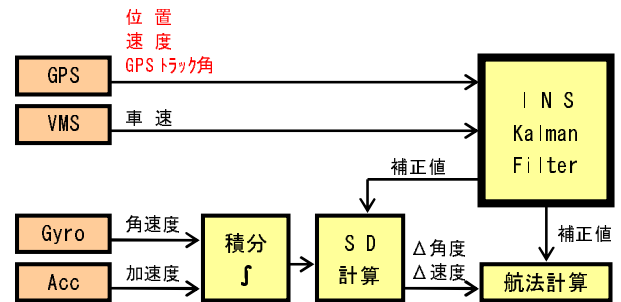


図3 ルーズカップリング方式：GPS が計算した位置・速度を使用する．4 衛星以下では GPS が無効となる．

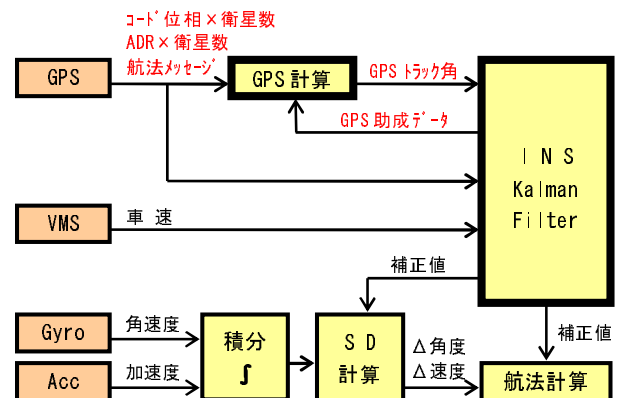


図4 タイトカップリング方式：本開発品で用いた方式で，GPS の生データであるコード位相，ADR を使用する．4 衛星以下でも INS の誤差を推定できる．

3 ハイブリッド方式

ハイブリッドは，INS カルマンフィルタに GPS および VMS のデータを取り込み，INS の誤差を逐次推定することにより実施される．推定したハイブリッド誤差は，補正值として INS 計算部にフィードバックされる．以下に，ハイブリッドの要点を述べる．

3.1 GPS ハイブリッド

GPS を使用した INS カルマンフィルタの代表的な方式として，ルーズカップリング方式とタイトカップリング方式が挙げられる．

図3に示すルーズカップリング方式では，GPS 受信機の出力する位置・速度を使用してハイブリッドを実施する．この方式では，4 衛星未満では GPS 受信機は信頼できる位置・速度を出力しないため，INS は GPS ハイブリッドを継続できなくなる．これに対して，図4に示すタイトカップリング方式では，GPS 受信機が捕捉した衛星単位の生データを直接使用するため，1 衛星の捕捉でも GPS ハイブリッドが継続できる．さらに，IGV の最大の特徴として，

同一の処理系に GPS 計算部をもち，INS のデータを GPS 助成データとしてフィードバックして少衛星環境での GPS 計算の持続を支援している．そのため，方位角誤差の推定に使用する GPS トラック角が連続して得られる．(高精度 INS の場合は GPS トラック角は不要．)これらの理由から，タイトカップリング方式はルーズカップリング方式に比べてロバスト性に優れた方式だと言える．

次に，タイトカップリング方式で使用する GPS 生データについて説明する．IGV の使用する GPS 生データには，大別すると次の3つがある．

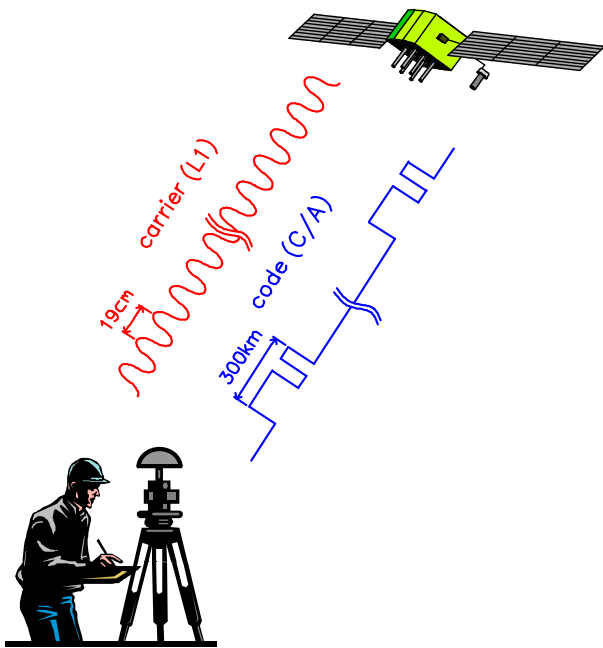


図5 コード位相とキャリア位相

(1) コード位相

GPS 衛星は、図 5 に示すように長さ約 300km の C/A コードを繰り返し送信している。1 C/A コードは 1023chip の符号で構成され、符号は衛星ごとに異なっている。

コード位相は、GPS 受信機の相関処理によって得られた 1 コードの小数部、すなわち、0 から 1023chip までの小数点以下を含んだ値である。IGV 内部では、コード位相を GPS ユーザから GPS 衛星までの距離に変換して使用している。この距離は誤差を含んだ距離であるため、シュードレンジ（擬似距離）と呼ばれる。以後、コード位相は変換後のシュードレンジと同義として表現する。

(2) ADR^{*2}

GPS 衛星は、前述したコードを運ぶ手段として、キャリア（搬送波）をスペクトル変調して送信している。

IGV の使用する L1 キャリアは図 5 に示すように、1 サイクル約 19cm の波長で、GPS 受信機はキャリア位相を追尾しながら変化量を測定している。ADR はこの変化量を積算したデータである。IGV 内部では、前後時間 Δt の ADR の変化量を計算して使用している。この変化量は、精度の高いシュードレンジの変化率に相当し、デルタレンジと呼ばれる。以後、ADR は変換後のデルタレンジと同義として表現する。

(3) 航法メッセージ

航法メッセージには、GPS 衛星の軌道計算やシュードレンジの誤差計算、衛星の棄却処理などに使用する情報が含まれており、エフェメリス（精密暦）、GPS 衛星時計補正

パラメータ、GPS 衛星の健康状態、電離層補正パラメータなどで構成されている。

3.2 VMS ハイブリッド

VMS データは、車両の車軸回転量をパルスにエンコードしたもので、IGV 内部では積分処理後に車速として使用している。車速は車両の進行方向の速度であるため、IGV の姿勢・方位角データを使用して 3 軸方向の速度ベクトルに変換した後、INS カルマンフィルタで使用している。

遮蔽物やジャミングなどの影響で、GPS 衛星が捕捉できないような現象が発生した場合は、VMS のみのハイブリッドで位置や速度精度の悪化をある程度抑制することができる。VMS ハイブリッドは、陸上用途では極めて有効な手段である。なお、生の VMS パルスから計算した車速は、送受信に関連する様々な誤差によって、実際の車速に一致しないことがある。そのため、IGV 内部ではスケールファクタの自動補正を実施している。ここでは、路面の傾斜によるタイヤの滑りなども考慮した補正を行っている。

4 INS アルゴリズムの概要

開発した主なアルゴリズムは、図 4 に示したように、タイトカップリング型の INS カルマンフィルタである。以降にアルゴリズムで使用する座標系の定義を説明し、INS カルマンフィルタの概要を述べる。

4.1 座標系

GPS システムは、WGS84^{*3}楕円体を地球モデルとし、地球の中心を原点とした ECEF^{*4}座標系で定義されている。ECEF 座標系では、図 6 のように赤道面上に $X_e Y_e$ 軸をとり、原点からグリニッジ子午線をみた方向を X_e 軸、北極点方向を Z_e 軸、右手直交座標系の方向に Y_e 軸をとる。

一方、INS の座標系は測地座標系、航法座標系、機体座標系で定義される。

測地座標系は、赤道面と現在位置から楕円体におろした垂線が交わる緯線に沿った角度を緯度、グリニッジ子午線から現在位置までの経線に沿った角度を経度とし、北半球および東経を正とする。

航法座標系は、現在位置を原点とし、原点から楕円体におろした垂線と垂直な面に $N' E'$ 軸をとり、 N' 軸を北極点方向、垂線をおろした方向を D 軸、 E' 軸を右手直交座標系の方向にとる。さらに $N' E'$ 軸を D 軸周りに α 回転させた NED 軸が航法座標系となる。 α はワンダーアングルと呼ばれる角度である。

機体座標系は、機体の前進方向に X 軸、 X 軸と直行する重力方向に Z 軸、右手直交座標系の方向に Y 軸をとる。

*2 ADR : Accumulated Delta Range

*3 WGS84 : World Geodetic System 1984

*4 ECEF : Earth Centered Earth Fixed

$X_e Y_e Z_e$: ECEF 座標系の軸
 NED : 航法座標系の軸
 A : 測地緯度
 λ : 測地経度
 h : 楕円体高度
 R : 地球半径

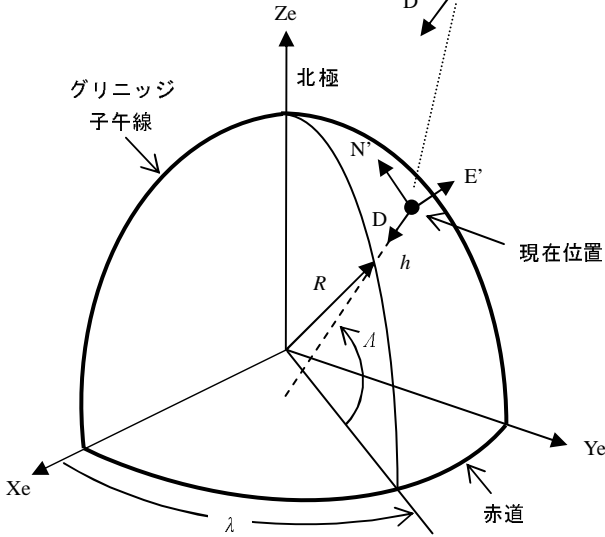


図6 座標系

表2 基準状態量と座標系

基準状態量		記号	座標系等
位置 $r_{3 \times 1}$	緯度	Λ	測地座標系
	経度	λ	
	高度	h	
速度 $v_{3 \times 1}$	南北速度	v_n	航法座標系
	東西速度	v_e	
	鉛直速度	v_d	
姿勢・方位角 $e_{3 \times 1}$	ロール角	ϕ	オイラー角
	ピッチ角	θ	
	ヨー角	ψ	
角速度 $g_{3 \times 1}$	x 軸角速度	g_x	機体座標系
	y 軸角速度	g_y	
	z 軸角速度	g_z	
加速度 $a_{3 \times 1}$	x 軸加速度	a_x	機体座標系
	y 軸加速度	a_y	
	z 軸加速度	a_z	
GPS 時計補正值 $c_{2 \times 1}$	時計バイアス	c_b	
	時計ドリフト	c_d	

注：記号の前に δ を付けた記号を誤差の状態量とする

4.2 INS カルマンフィルタ

INS カルマンフィルタは、GPS の観測値が得られる周期で実行され、表2に示す基準状態量の誤差を推定している。ここでは、表2の記号に δ を付けたものを誤差の状態量と呼び、カルマンフィルタで推定する誤差とする。

INS カルマンフィルタでは、非線形システムに対応するために拡張カルマンフィルタの手法が適用され、誤差を線形化して推定している。 x を誤差の状態量ベクトル、 P を誤差共分散行列、 F を遷移行列、 Q をプロセスノイズ行列、 z を観測残差ベクトル、 H を観測行列、 R を観測値の分散行列、 K をカルマンゲインとすると、拡張カルマンフィルタ [1, 2] は式 (1) ~ 式 (5) で表される。

$$\hat{x}_{t+1/t} = F_t \hat{x}_{t/t} \quad (1)$$

$$P_{t+1/t} = F_t P_{t/t} F_t^T + Q_t \quad (2)$$

$$\hat{x}_{t/t} = \hat{x}_{t/t-1} + K_t (z_t - H_t \hat{x}_{t/t-1}) \quad (3)$$

$$P_{t/t} = P_{t/t-1} - K_t H_t P_{t/t-1} \quad (4)$$

$$K_t = P_{t/t-1} H_t^T (H_t P_{t/t-1} H_t^T + R_t)^{-1} \quad (5)$$

IGV の INS カルマンフィルタでは、一定の時間間隔で式 (1) と式 (2) を用いて誤差の状態量 x および誤差共分散

行列 P を更新している。この更新を時間更新と呼ぶ。その後、式 (3) ~ 式 (5) を用いて GPS と VMS の観測値を使用した更新を実施している。この更新を観測更新と呼ぶ。

時間更新では観測更新の間に变化する誤差を INS や GPS のシステム方程式に基づいて更新している。観測更新によって時間更新した誤差の状態量と誤差共分散を更新し、最適な推定値を得る。ただし、大きな誤差が存在する観測値を使用して更新した場合は、フィルタの収束が遅れたり性能が劣化する場合があるため、観測値の検定を様々な手法で実施している。誤差の状態量は定期的に SD 計算部および航法計算部にフィードバックされ、0 にリセットされる。

次に、式 (1) ~ 式 (5) の各行列およびベクトルの概要を説明する。

(1) 誤差状態量ベクトル

誤差の状態量ベクトル x は表2で示した基準状態量の誤差を定義した 17 次のベクトルであり、誤差の記号 δ を用いて次のように表す。

$$x = [\delta r \quad \delta v \quad \delta e \quad \delta g \quad \delta a \quad \delta c]^T \quad (6)$$

ここで、 δr は位置誤差、 δv は速度誤差、 δe は姿勢・方位角誤差、 δg はジャイロ誤差、 δa は加速度計誤差、 δc は GPS 時計補正值の誤差ベクトルである。

(2) 誤差共分散行列

誤差共分散行列 P は、対角成分が誤差の状態量 x の自己共分散となる行列で、自己共分散は、INS の精度を確認する手段として利用される。よって、自己共分散が誤差の

状態量の分散に一致するように設計されたフィルタが、最適なフィルタであるといえる。

なお、本開発品ではフィルタの安定性を確保するために共分散行列 P は UD 分解している。よって、実際には P の代わりに U 行列と D 行列を更新している。

(3) 遷移行列

遷移行列 F は、INS の位置、速度、姿勢・方位角、GPS 時計補正值などを計算するシステム方程式から得られる 17×17 の行列で、次式のように表せる。行列の添え字は表 2 の記号に対応している。よって、 F_{rr} は位置誤差による位置誤差の遷移、 F_{rv} は速度誤差による位置誤差の遷移、 \dots 、 F_{cc} は GPS 時計補正值誤差による GPS 時計補正值誤差の遷移を定式化した行列となる。

$$F = \begin{bmatrix} F_{rr} & F_{rv} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ F_{vr} & F_{vv} & F_{ve} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & F_{va} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ F_{er} & F_{ev} & F_{ee} & F_{eg} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & F_{gg} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & F_{aa} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & F_{cc} \end{bmatrix} \quad (7)$$

(4) プロセスノイズ行列

プロセスノイズ行列 Q は、ジャイロ、加速度計、GPS 時計のノイズ等によって発生する INS 誤差および GPS 時計補正值誤差の分散を設定する行列である。

(5) 観測残差ベクトル

観測残差ベクトル z は、基準状態量を使用して計算した観測値のモデル推定値と、実際に得られた観測値の差分を設定するベクトルである。観測残差ベクトルは次式のとおりに現せる。

$$z = \begin{bmatrix} z_{pr}^{(1)} & \dots & z_{pr}^{(n)} & z_{dr}^{(1)} & \dots & z_{dr}^{(n)} \\ & & & z_{vn} & z_{ve} & z_{vd} & z_{ta} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

ここで、 n は使用する GPS 衛星の数、 z_{pr} 、 z_{dr} 、 z_{ta} はシュードレンジ、デルタレンジ、GPS トラック角の観測残差である。また、 z_{vn} 、 z_{ve} 、 z_{vd} は航法座標系の南北、東西、鉛直速度の観測残差で、IGV の速度と VMS から得た車速を IGV の姿勢・方位角で分解した速度の差である。

なお、時刻 t_A におけるシュードレンジの推定モデル $p(t_A)$ は、GPS アンテナから GPS 衛星までの幾何学距離に誤差を加えて次式のように表せる [3, 4]。

$$p(t_A) = \|\mathbf{r}_e(T_A) - \mathbf{r}^{SV}(T^{SV})\| + c_b(t_A)c + \delta p \quad (9)$$

ここで、 \mathbf{r}_e 、 \mathbf{r}^{SV} は ECEF 座標系の GPS アンテナと GPS 衛星の位置である。 T^{SV} は GPS 衛星が電波を送信した真の時刻、 T_A および t_A は GPS 受信機が電波を受信した真の時刻と誤差を含んだ時刻、 c は光速である。また、 δp は電離層や対流圏遅延、GPS 衛星の電波送信遅延による誤差

で、モデル式などを使用して計算している。 c_b は GPS 受信機の時計バイアスでカルマンフィルタで推定している。

また、デルタレンジは Δt 時間におけるキャリア位相の変化量で、GPS アンテナと GPS 衛星の幾何学距離の変化量と誤差を用いて表せる。時刻 t_A におけるデルタレンジの推定モデル $\Delta\phi(t_A)$ は、

$$\Delta\phi(t_A) = \frac{1}{\lambda_{L1}} \begin{bmatrix} \|\mathbf{r}_e(T_A) - \mathbf{r}^{SV}(T^{SV})\| \\ -\|\mathbf{r}_e(T_A - \Delta t) - \mathbf{r}^{SV}(T^{SV} - \Delta t)\| \\ +c_d(t_A)c\Delta t \end{bmatrix} \quad (10)$$

となる [4]。 c_d は GPS 時計ドリフト、 λ_{L1} は L1 キャリアの波長である。

(6) 観測行列

観測行列 H は H_{pr} 、 H_{dr} 、 H_{ta} をシュードレンジ、デルタレンジ、GPS トラック角の観測行列とし、 H_{vn} 、 H_{ve} 、 H_{vd} を航法座標系における速度の観測行列とすると、

$$H = \begin{bmatrix} H_{pr}^{(1)} & \dots & H_{pr}^{(n)} & H_{dr}^{(1)} & \dots & H_{dr}^{(n)} \\ & & & H_{vn} & H_{ve} & H_{vd} & H_{ta} \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

である。

(7) 観測値の分散行列

観測値の分散行列 R には、カルマンフィルタの観測値の分散を設定する。よって σ_{pr} 、 σ_{dr} 、 σ_{ta} をシュードレンジ、デルタレンジ、GPS トラック角の標準偏差とし、 σ_{vn} 、 σ_{ve} 、 σ_{vd} を航法座標系の速度の標準偏差とすると、

$$R = \text{diag} \begin{bmatrix} \sigma_{pr}^{(1)2} & \dots & \sigma_{pr}^{(n)2} & \sigma_{dr}^{(1)2} & \dots & \sigma_{dr}^{(n)2} \\ & & & \sigma_{vn}^2 & \sigma_{ve}^2 & \sigma_{vd}^2 & \sigma_{ta}^2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

となる。本アルゴリズムでは、シュードレンジとデルタレンジの分散は、衛星ごとに仰角を用いた重み付け調整を実施している。航法座標系の速度や GPS トラック角の分散も、車速や INS の角速度データを利用して重み付け調整を実施し、精度の向上を図っている。

(8) カルマンゲイン

カルマンゲイン K は共分散行列 P と観測値の分散行列 R に基づいたゲイン配分を実施しており、観測値の品質には依存していない。よって、観測値にマルチパスなどによって大きな誤差が発生しても、過渡に誤差推定値を操作するようなゲイン配分を行わないのが特徴である。

5 GPS 計算アルゴリズムの概要

初めに、後述する説明で使用するベクトル・数値を表 3 で定義する。記号の前に δ を付けた場合は誤差の状態量として使用する。

GPS 計算部の主目的は、GPS トラック角を計算することである。その過程で、GPS トラック角の計算に必要な

表3 GPS計算の基準状態量と座標系

基準状態量		記号	座標系等
GPS アンテナ位置 $r_{3 \times 1}^G$	緯度	Λ^G	測地座標系
	経度	λ^G	
	高度	h^G	
GPS アンテナ速度 $v_{3 \times 1}^G$	南北速度	v_n^G	航法座標系
	東西速度	v_e^G	
	鉛直速度	v_d^G	
GPS 時計補正值 $c_{2 \times 1}^G$	時計バイアス	c_b^G	
	時計ドリフト	c_d^G	

注：記号の前に δ を付けた記号を誤差の状態量とする

GPS 位置と速度を計算している。GPS トラック角 ψ^G は GPS 計算で求めた南北速度 v_n^G および東西速度 v_e^G を使用して、

$$\psi^G = \tan^{-1} \left(\frac{v_e^G}{v_n^G} \right) \quad (13)$$

と計算できる。上式を見ると、GPS 速度誤差は GPS トラック角 ψ^G の精度に影響を及ぼすことが分かる。特に低速時には、僅かな速度誤差が大きな GPS トラック角誤差となる。よって、GPS 速度の計算精度が INS の性能に大きな影響を及ぼすことが分かる。

GPS 計算の方式には最小二乗法とカルマンフィルタの2種類がある。本開発品は陸上で運用する移動体を対象としており、電波の遮断等が発生しやすい環境での使用を視野に入れる必要がある。そのため、カルマンフィルタ方式を用いた場合は、電波の復帰後に最適な収束解を得るまでに時間を必要とする場合がある。これに対して、最小二乗法では観測データを得るごとに最適な収束解を導くことができるため、本開発品においてはカルマンフィルタ方式に対して利点がある。そのため、GPS 計算のアルゴリズムには最小二乗法を選定した。以降に最小二乗法による GPS 計算の概要を述べる。

(1) GPS 位置の計算

4 つ以上の GPS 衛星が利用できる場合は、最小二乗法による GPS アンテナの位置ベクトル r^G は次式で計算できる [3]。なお、 X^G は基準状態量の GPS アンテナ位置および時計バイアスからなるベクトル、 δx^G は最小二乗法で計算する基準状態量の誤差ベクトルである。

$$X^G = X_0^G + \delta x^G \quad (14)$$

$$X^G = \begin{bmatrix} r^G & c_b^G \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

$$\delta x^G = \begin{bmatrix} \delta r^G & \delta c_b^G \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

$$\delta x^G = (H_{pr}^T R_{pr} H_{pr})^{-1} H_{pr}^T R_{pr} z_{pr} \quad (17)$$

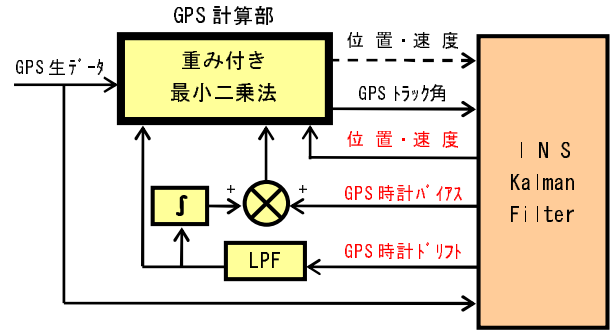


図7 最小二乗法へのフィードバック

X_0^G はループ計算における初期位置または計算途中の位置ベクトルで、 δx^G が十分に小さくなるまでループ計算を実行する。また、 H_{pr} 、 R_{pr} 、 z_{pr} はそれぞれシュドレンジの観測行列、重み行列、観測残差ベクトルである。

(2) GPS 速度の計算

GPS の速度計算も位置計算と同様の手法で計算できる。すなわち、式 (15)~式 (17) の位置ベクトル r^G と時計バイアス c_b^G を速度ベクトル v^G と時計ドリフト c_d^G に変更し、シュドレンジの観測行列、重み行列、観測残差ベクトルをドブラ周波数のものに変更すればよい。

なお、ドブラ周波数の観測残差ベクトルはドブラ周波数の観測値から推定値を引いたベクトルで、観測値はデルタレンジの観測値をキャリア位相の単位時間の変化量に正規化すればよい。ドブラ周波数の推定モデル (Hz) は次式とした。

$$\dot{p}(t_A) = \frac{u^G(T_A)^T}{\lambda_{L1}} (v^{SV}(T^{SV}) - v_e^G(T_A)) + \frac{c_d^G(t_A)c}{\lambda_{L1}} \quad (18)$$

ここで、 u^G は GPS アンテナから GPS 衛星への目視線ベクトル、 v^{SV} 、 v_e^G は ECEF 座標系の GPS 衛星と GPS アンテナの速度ベクトルである。

(3) 少衛星環境での計算

汎用の GPS 受信機では、GPS 単独計算で 3 次元の推定解を得るためには 4 衛星以上を捕捉している必要があり、4 衛星以上であっても、衛星の配置状況によっては精度が望めないために計算を行わないことがある。

これに対し、本アルゴリズムではロバスト性を確保するために、2 衛星の捕捉でも規定の衛星配置条件を満たすことを条件に GPS 計算を実行している。これは、図 7 に示すように INS のデータを GPS 計算部にフィードバックすることで可能にした技術である。

INS のフィードバックデータは位置、速度、時計バイアス、GPS 時計ドリフトである。すなわち、GPS 計算部が計算する基準状態量をフィードバックしている。GPS 計算



性能

位置 : < 17 [m SEP]
 速度 : < 0.1 [m/s rms]
 姿勢角 : < 0.05 [°rms]
 方位角 : < 0.1 [°rms]

図 8 基準器の概要

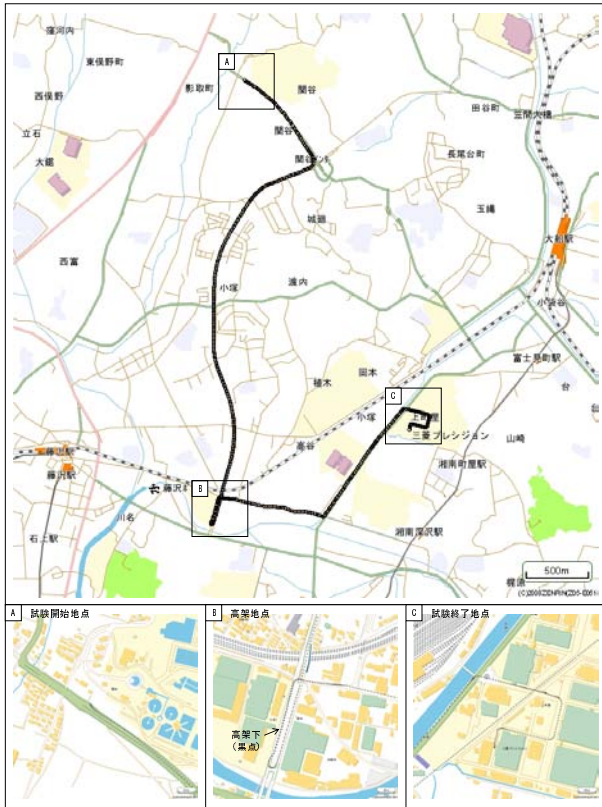


図 9 航跡図 - IGV 出力位置

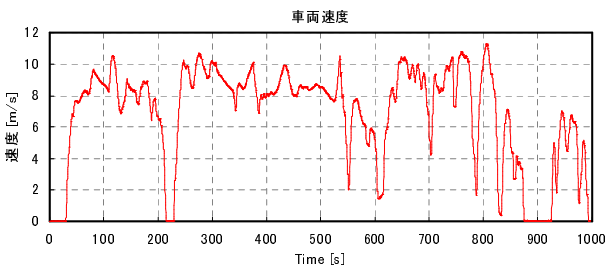
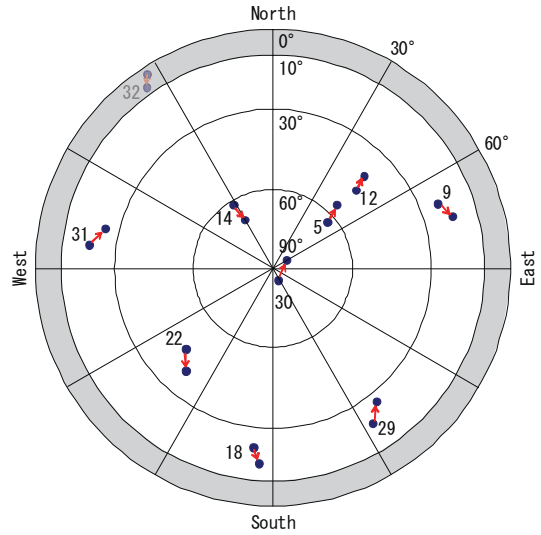
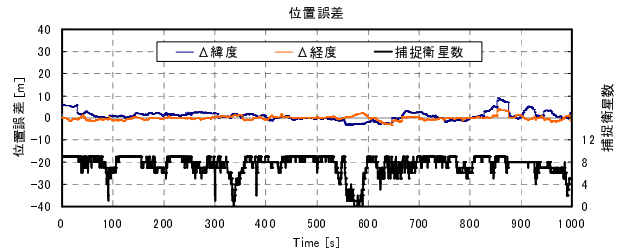


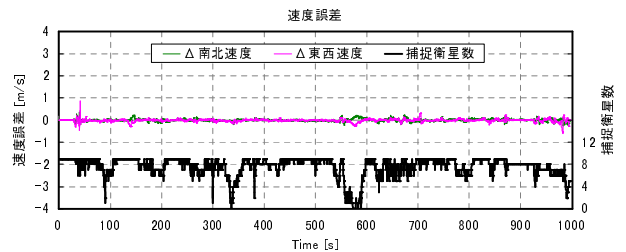
図 10 車両速度



(a) スカイプロット-仰角マスク 10° (全時間)



(b) 位置誤差-仰角マスク 10° (全時間)



(c) 速度誤差-仰角マスク 10° (全時間)

図 11 通常の GPS 衛星捕捉時のスカイプロットと位置・速度誤差 - 仰角マスクを 10° に設定 (全時間) .

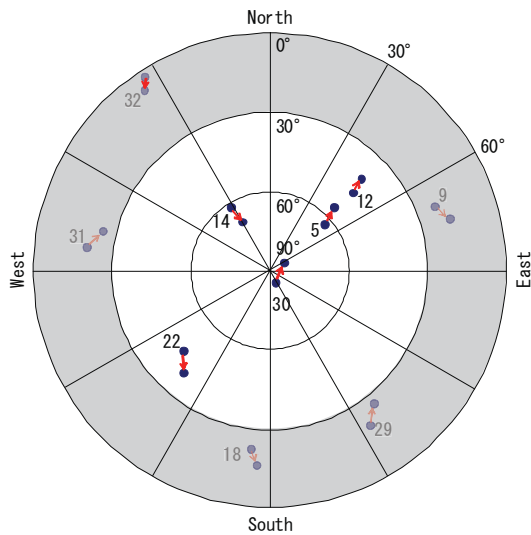
部は衛星が少ない場合や、衛星配置が良好でない場合に推定する次元を減らし、減らした次元は INS データを使用して GPS 計算を実行している。このようにして、2 衛星しか捕捉していない場合でも GPS 計算を実行し、GPS トラック角を計算している。

推定次元を減らした場合の計算は、位置の場合は式 (15) ~ 式 (17) で減らす次元の要素を消去して計算すればよい。

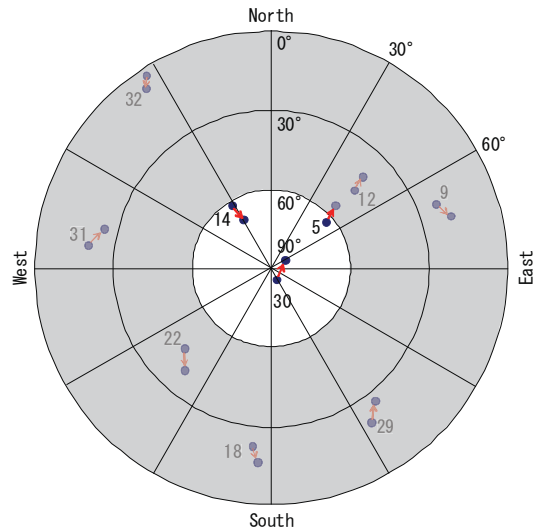
6 走行試験による評価

6.1 通常の GPS 衛星捕捉状態での評価

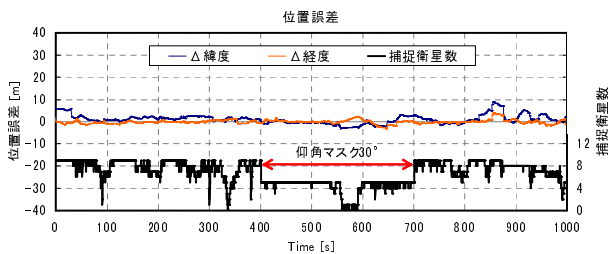
次に、走行試験の結果を述べる。走行試験は、車両に IGV と基準器となる高精度の INS/GPS を搭載して実施した。性能の評価は、IGV と基準器のデータを高速かつ同時に取得し、両装置間の差を誤差として評価した。基準器は慣性センサにリングレーザージャイロとサーボ加速度計を使用しており、バイアスはそれぞれ 0.003°/hr(1σ), 20μG(1σ)



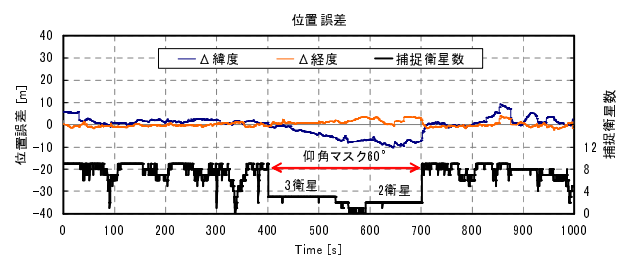
(a) スカイプロット-仰角マスク 30° (400~700s)



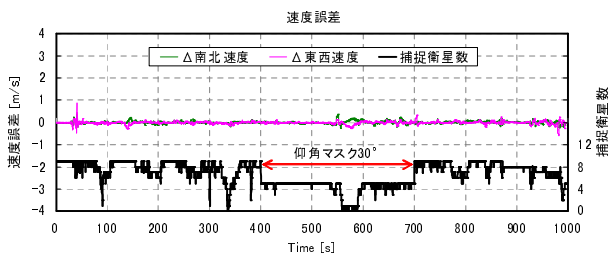
(a) スカイプロット-仰角マスク 60° (400~700s)



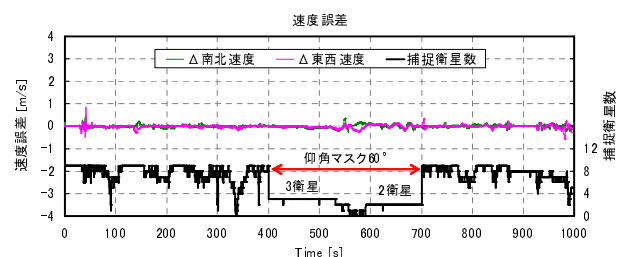
(b) 位置誤差-仰角マスク 30° (400~700s)



(b) 位置誤差-仰角マスク 60° (400~700s)



(c) 速度誤差-仰角マスク 30° (400~700s)



(c) 速度誤差-仰角マスク 60° (400~700s)

図 12 GPS 衛星減少時のスカイプロットと位置・速度誤差 (Case1) - 仰角マスクを 30° に設定 (400~700s) .

図 13 GPS 衛星減少時のスカイプロットと位置・速度誤差 (Case2) - 仰角マスクを 60° に設定 (400~700s) .

以下である．基準器の概要は図 8 に示すとおりである．

走行試験は、図 9 の航跡図(IGV の位置出力)に示すコースで実施し、A 地点を試験開始地点、C 地点を試験終了地点とした．この時の車両の速度を図 10 に示す．

試験を実施した日付・時刻の衛星配置は、図 11(a) のスカイプロットで表すことができる．水平線近くの衛星は電波の品質が悪いことが多いために、仰角が 10° 以下の衛星は常時使用しないようにしている．よって、障害物がない場合は、最大で 9 個の衛星が捕捉できる状態であった．

これらの衛星配置、車両運動の状態における IGV の位置・速度誤差は図 11(b,c) のようになり、ハイブリッド開始後のデータを用いて計算した位置精度および速度精度は表 4 のとおりになった．よって、目標である位置精度 10m rms，速度精度 0.5m/s rms 以下を達成することができた．これにより、開発した IGV のハードウェア、ソフトウェア、およびアルゴリズムの妥当性を確認することができた．

また、捕捉衛星数が連続して 4 個未満になった時間帯 (560~590s) でも、目標性能を維持しており、0~3 個の

表 4 位置・速度・精度

項 目		精 度
位 置	緯度誤差	2.1 [m rms]
	経度誤差	1.0 [m rms]
	水平誤差	2.3 [m rms]
速 度	南北誤差	0.06 [m/s rms]
	東西誤差	0.07 [m/s rms]
	水平誤差	0.09 [m/s rms]

表 5 位置・速度・精度 (仰角マスク 30°, 400~700s)

項 目		精 度
位 置	緯度誤差	1.6 [m rms]
	経度誤差	1.0 [m rms]
	水平誤差	1.9 [m rms]
速 度	南北誤差	0.08 [m/s rms]
	東西誤差	0.06 [m/s rms]
	水平誤差	0.10 [m/s rms]

GPS 衛星と VMS を使用したハイブリッドが有効に機能していることが確認できた。

6.2 GPS 衛星減少時の評価

IGV は、サンプリングした全ての角速度、加速度、GPS、および VMS のデータを高速で出力しているために、記録したデータを用いることで、IGV が実際に実施する演算と同等の演算を後処理で再現することができる。

ここでは、低仰角の衛星が障害物のために補足できない環境を想定し、後処理のソフトウェアを変更することによって、仰角が 30° または 60° 以下の衛星を 5 分間使用しない 2 通りの模擬を実施した。

図 12(a,b,c) は仰角マスクを 30° にした場合のスカイプロットと位置・速度誤差を図示したものである。この時、捕捉衛星数は 9 衛星から 5 衛星に減少したが、IGV の位置および速度精度は通常の状態 (仰角マスク 10°) と同等の精度を維持していた。

図 13(a,b,c) は仰角マスクを 60° にした場合のスカイプロットと位置・速度誤差を図示している。捕捉衛星数は 9 衛星から 3 衛星になり、その後 2 衛星まで減少した。この捕捉状態では GPS 受信機は位置・速度を計算することはできない。しかし、IGV の位置誤差は仰角マスク 30° のケースに若干劣るものの、常時 10m 以内を保っており、良好な精度を維持することができた。これらの結果により、GPS 衛星が減少した環境でも、タイトカップリング方式のアルゴリズムによって INS の精度劣化を抑制することが確認できた。

衛星を減少させた時間帯の精度は表 5 および表 6 に示すとおりである。

表 6 位置・速度・精度 (仰角マスク 60°, 400~700s)

項 目		精 度
位 置	緯度誤差	6.2 [m rms]
	経度誤差	1.9 [m rms]
	水平誤差	6.5 [m rms]
速 度	南北誤差	0.09 [m/s rms]
	東西誤差	0.08 [m/s rms]
	水平誤差	0.12 [m/s rms]

7 むすび

本開発ではハイブリッド・アルゴリズムに従来の VMS ハイブリッド処理に加え、GPS ハイブリッド処理を追加することによって、低価格な MEMS INS/GPS/VMS 複合システムではあるが、高精度 INS に迫る性能を達成することができた。

また、GPS ハイブリッド処理にタイトカップリング方式を採用した結果、少衛星環境での性能劣化の抑制を実験データによって実証することができた。加えて、少衛星の捕捉となった場合でも標準の衛星配置状態に近い性能が得られたことから、ロバスト制御型のアルゴリズムの開発を完遂することができたと言える。

謝 辞

IGV の開発に当たって、ご協力頂いた関係各位に感謝致します。特に、電子精密機器部の川野谷殿には、慣性演算やソフトウェア設計、データ解析等で多大なご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 片山徹：新版 応用カルマンフィルタ，朝倉書店，2000，pp.83-182
- [2] 畑剛，泉達司，川口淳一郎：航空・宇宙における制御，コロナ社，1999，pp.89-101
- [3] 西村敏充，金井喜美雄，村田正秋：航空宇宙における誘導と制御，コロナ社，1995，pp.161-252
- [4] 張替正敏，辻井利昭，村田正秋，小野考次，稲垣敏治，富田博史：航空宇宙技術研究所報告 TR-1398 DGPS/INS 複合航法システムの理論精度解析とその飛行実証，科学技術庁航空宇宙技術研究所，2000，pp.4-30

[執筆者紹介]



倉金 徹 略歴

1999年入社，主にGPSを応用した慣性機器の開発に従事，現在，電子精密機器部慣性機器課

新マイパークシリーズ駐車場料金精算システム

駐車券の発行や駐車料金の自動計算、領収書の発行など、入場から出場まで、すべて全自動で行います。車番システム、電子マネー、防犯性の強化などニーズに対応可能な新マイパーク駐車場料金精算システムです。

■特徴

●千円紙幣の収納枚数がアップ

千円札を450枚収納タイプになり、収容枚数がアップしました。オプションで、1,000枚収納タイプも選択可能です。

●防犯性の向上

ドリルによる鍵の破壊や、バールによる扉の破壊対策を強化するとともに、前面操作部からの破壊対策など、標準で防犯性を高めた構造としました。

*1：電子マネー運営事業者との加盟店契約が別途必要です。

*2：

JR東日本 Suica 利用承認第39号

※当該承認は、東日本旅客鉄道株式会社が本商品・サービスの内容・品質を保証するものではありません。

※東日本旅客鉄道株式会社の都合により、予告なくSuica カードが交換されることがあります。

●豊富なオプション

・電子マネー対応^{*1}

精算機のSuicaまたはPASMO対応により、どちらの決済にも対応できます。また、発券機もSuicaまたはPASMO対応をすることにより、「駐車券を使わない料金精算」、「定期券を使わない入出場チェック」が可能となりました。

・車番認識システム^{*2}

車番認識カメラ+事前精算システムで、スムーズな出場が実現できます。

・紙幣リーダの選択^{*3}

千円札専用、または還流式(高額紙幣/つり札対応)のいずれかが選択可能です。

・駐車券リーダの選択

高寿命リーダが搭載可能です。これにより清掃および点検の頻度が軽減でき、管理コストの低減が可能です。

*3：

※(株)パスモ商標利用許諾済 第45号

※ PASMO マーク



PASMO

は(株)パスモが本商品・サービスの

内容・品質を保証するものではありません。

※(株)パスモの都合により予告なくPASMO カードが交換されることがあります。

※Suica は東日本旅客鉄道株式会社の登録商標です。



AP-390
全自動精算機

(627W × 1,300H × 610D, 185kg 以下)



CT-600
アームキャッチャー

(349W × 1,156H × 200D, 20kg 以下)

GT-651
カーゲート

(400W × 1,100H × 230D, 70kg 以下)



TD-390
駐車券発行機

(370W × 1,290H × 540D, 70kg 以下)

新型車番認識システム 車番認識装置 NR-100

車番認識システムは駐車場料金収受システムと連動することで、定期契約車両の自動ゲート開入出庫、および事前精算済車両の自動ゲート開出庫ができ、駐車場における車両の入出庫を円滑にします。

■特徴

●画像処理機能一体型

新型車番認識装置 NR-100 に画像処理機能を内蔵するため、従来の画像処理装置が不要となります。

⇒大規模システムの構築が容易（省スペース化）

⇒24時間運用で安定した動作

●認識プレートの対象拡大(目標仕様)

プレートの傾きに対する読取範囲の向上により、従来と比較して認識しづらい車両でも認識できるように性能をアップしました。

⇒車両進入角度：現行 $\pm 5^\circ$ → 目標 $\pm 10^\circ$

●配管・配線工事が容易

画像処理装置が不要となるので、従来の映像信号線、制御信号線は不要となります。（図1参照）

通信インターフェースはパーキングバス回線(有極性2線式)で、車番認識装置を精算機・発券機と接続するだけで簡単にシステムを構築できます。

⇒配管・配線工事の簡素化でコストダウン

※カメラを左右対向で設置する場合は、別途左右カメラ間に通信(RS-422)を用意してください。

●認識画像の保存が可能

別売のSDメモリカード(16GB)を使用することで、撮像画像を約1週間分(1,000台/1日)保存することができます。

⇒認識できなかった車両の映像保存が可能

※画像再生には別途PCが必要となります

●高速車両の対応(オプション)

高速車両「40km/h以下」の車番認識が可能です。（現状20km/h以下）

⇒工場入退場、来場車両地域動向調査等のシステムに応用可能

●既存システムに対応

車番管理計算機のカメラ構成設定変更、およびPバス線追加により、既存システムへの対応が可能です。

●調整・保守

車番認識装置に調整用PCを接続することで、カメラ画角調整、および各種設定が行えます。

カメラ近傍で各種調整が行えるため、調整作業が容易に行えます。

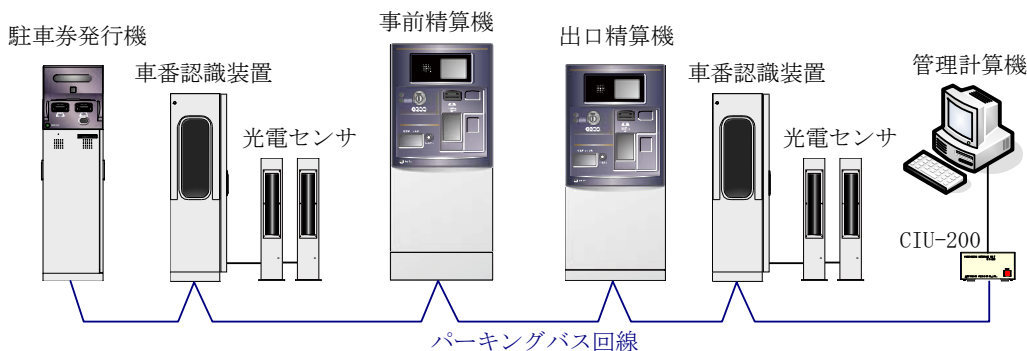


図1 車番認識システムの機器構成



図2 装置外観

鉄道訓練シミュレータ

鉄道訓練シミュレータでは、運転士・車掌の基本動作、異常時の取扱いおよび事故対応等の乗務員養成やフォローアップ訓練が行えます。

■特徴

●運転士訓練

基本操縦訓練、異常時・車両故障時の取扱い訓練ができます。実車同様の乗務員室、運転状況に連動するCG映像と動揺装置により、現実に近い環境での訓練を、安全に繰り返し行うことができます。

●車掌訓練

確実な安全確認や適切な情報伝達方法を訓練し習得することができます。プラットフォームの停止位置表示装置、側方視界映像、後方視界映像により、リアルな環境を再現します。

●連携訓練

運転士・車掌・駅係員・信号係・指令員などの連携訓練が可能のため、コミュニケーション能力の向上をはじめ的確な判断および迅速な処理能力を習得できます。

●レクチャーシステム

シミュレータ操作と連動する回路図や運転曲線等を表示し、車両の構造を理解できます。また、シミュレータでの運転操作の履歴を記録・表示できるので、客観的に振り返り、分析・学習することが可能です。

【納入事例】

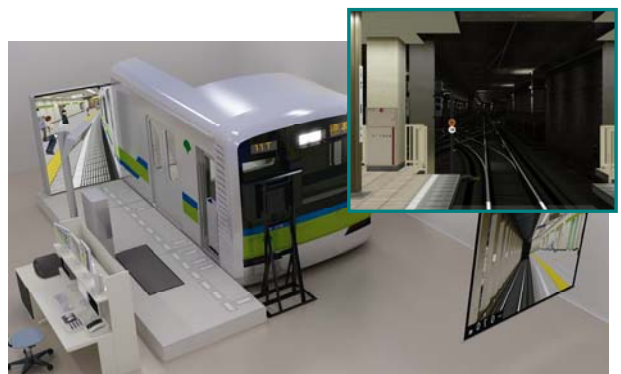
京王電鉄株式会社 9000系シミュレータ

100インチ大画面のレクチャーシステム連動



東京都交通局 10-300形乗務員養成シミュレータ

車両の特徴であるD-ATCやTIMSの動作を再現



東武鉄道株式会社 50000系/10000系鉄道運転訓練シミュレータ

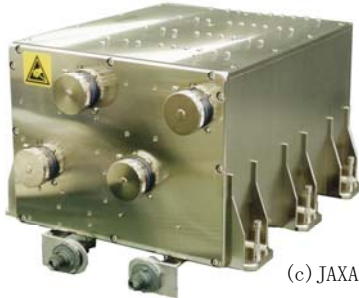
最大5者の鉄道運転関係従事員の連携訓練が可能



データ・インタフェース・ユニット(DIU)

国際宇宙ステーション 日本実験モジュール「きぼう」搭載

有人ミッションに必要な安全性と高信頼性を実現



(c) JAXA

DIUにはDIU-I, DIU-IIIの2種があり「きぼう」の船内実験室(*1)に艀装(*2)され、「きぼう」内の各種センサ(温度センサ, 煙センサ等)及び制御機器からの

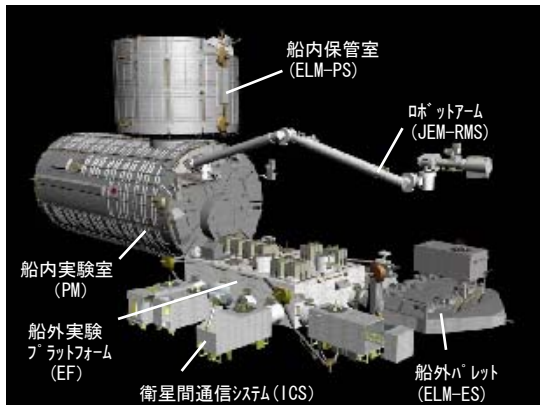
データを収集し, JEM 管制制御装置(JCP)を介して地上にデータを送信しています. また, JCPからのコマンドにより「きぼう」内の各種エフェクタ(循環ファン, バルブ, 煙センサ等)及び制御機器を制御します. DIU-IIIについては, JCPとのインタフェースに加え, 米国宇宙ステーションに艀装されたNASAの管制制御装置(C&C MDM)(*3)とのインタフェースを有し, 「きぼう」起動時には「きぼう」内の環境をC&C MDM経由で地上に送信すると共に, C&C MDMからのコマンドに従い「きぼう」を初期起動するための各種機器の制御を行う重要な任務を果たしました.

(2008年6月5日「きぼう」起動)

*1: 「きぼう」は船内実験室(PM), 船内保管室(ELM-PS), 船外実験プラットフォーム(EF), 船外バレット(ELM-ES), ロボットアーム(JEM-RMS), 衛星間通信システム(ICS)から構成されます.

*2: DIU-I 6台, DIU-III 2台

*3: Command and Control Multiplexer/Demultiplexer



(c) JAXA

■特徴

宇宙ステーション搭載機器に要求される厳しい安全基準に適合させるため, DIUにはオフガスが少なく, 非可燃性及び抗菌性の材料を使用し, シャープエッジの無い外観構造を採用することにより宇宙飛行士に対する安全性を確保しています. 軌道上での交換を想定し全ての入出力信号ラインにはビルトインテスト機能が設けられ, 万一故障した場合でも, 故障部位が特定できる構成となっています. また, DIU底面にはコールドプレートが装着され, 水循環により冷却する構造となっています.

■主要性能諸元

●外形寸法

DIU-I : 400(W) × 332(D) × 238(H) (突起部除く)

DIU-III : 340(W) × 332(D) × 215(H) (突起部除く)

●質量

DIU-I : 23kg 以下, DIU-III : 18kg 以下

●入力電圧

制御用電源 : 111.0V ~ 126.0V

バルブドライブ用電源 : 111.0V ~ 126.0V

●消費電力

DIU-I : 57W 以下, DIU-III : 50W 以下

■主要機能

●JCP インタフェース機能

信号形態 : MIL-STD-1553B

●MDM インタフェース機能(DIU-IIIのみ)

信号形態 : MIL-STD-1553B

●シリアル通信機能

信号形態 : RS-422

ポート数 : 6(DIU-I/III 共通)

●アナログ入力機能(アクティブ入力)

入力範囲 : ±10V(差動)

分解能 : 12bit

A/D 変換精度 : ±1% of フルスケール

チャンネル数 : 24ch(DIU-I), 16ch(DIU-III)

●アナログ入力機能(パッシブ入力)

入力範囲 : 0 ~ 10kΩ

分解能 : 12bit

A/D 変換精度 : ±1% of フルスケール

チャンネル数 : 24ch(DIU-I), 8ch(DIU-III)

●アナログ出力機能

出力範囲 : -10V ~ +9.92V(差動)

分解能 : 8bit

D/A 変換精度 : ±2% of フルスケール

チャンネル数 : 14ch(DIU-I/III 共通)

●ディスクリート入力機能(アクティブ)

チャンネル数 : 32ch(DIU-I/III 共通)

●ディスクリート入力機能(パッシブ)

チャンネル数 : 32ch(DIU-Iのみ)

●ディスクリート出力機能(アクティブ)

チャンネル数 : 32ch(DIU-I), 16ch(DIU-III)

●ディスクリート出力機能(パッシブ)

チャンネル数 : 32ch(DIU-I), 16ch(DIU-III)

●バルブドライブ出力機能

チャンネル数 : 12ch(DIU-I), 8ch(DIU-III)

●ビルトインテスト機能

●火災検知機能

(写真提供: 宇宙航空研究開発機構)

Technical Data Acquisition equipment (TEDA)

技術試験衛星Ⅷ型「きく8号」搭載 技術データ取得装置

宇宙空間では地上と異なり、宇宙放射線に直接曝されるため、電子機器が放射線の影響で劣化や誤動作を引き起こすことから放射線環境を正確に知る必要があります。宇宙機の設計においては宇宙放射線環境をモデル化して使用しますが、このモデルを放射線に弱い民生部品や生物及び有人へ適用するため、より高精度化が求められています。

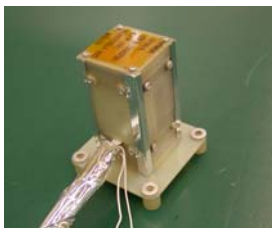
当社が開発した技術データ取得装置(TEDA)は静止衛星「きく8号」に搭載され、宇宙放射線環境モデルの基礎となる各種データを取得しています。

きく8号は、3トン級静止衛星バス技術の習得、大型展開構造物などの基盤技術の習得、移動体衛星通信システム及び移動体衛星デジタルマルチメディア放送システムの技術開発、高精度時刻基準装置による測位などの基盤技術の習得を目的に開発された衛星で2006年12月に打上げられました。

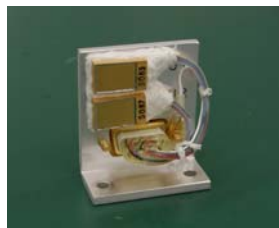
■特徴

TEDA は以下の4種類の計測センサとデータ収集装置(TEDA-E)で構成されています。

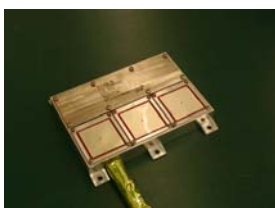
- (1) 磁場の計測 (MAM)
- (2) 積算吸収線量の計測 (DOS)
- (3) 帯電電位の計測 (POM)
- (4) シングルイベント・アップセットの計測 (SUM)



磁場の計測



積算吸収線量の計測



帯電電位の計測



シングルイベント・アップセットの計測

●磁場の計測

磁力計 (Multi-range fluxgate Magnet Meter : MAM) はアンテナタワーに搭載して宇宙放射線の変動と関係する地球磁場の3軸成分を測定します。MAMは、高精度で測定できるフラックスゲート型のセンサを使用し、4つのレンジ(±256nT～±65536nT)で0.5秒間隔の測定が可能です。

●積算吸収線量の計測

積算吸収線量計 (Dose Monitor : DOS) は被曝量(トータルドーズ)を計測します。

DOSは衛星構体の東西面方向とTEDA電子回路部(TEDA-E)の内部に搭載され、ドーズ量の時間変化や太陽活動の強度によってどのように変化するかを測定します。センサとして小型のRAD-FETを使用し、4500Gy迄の計測が可能です。

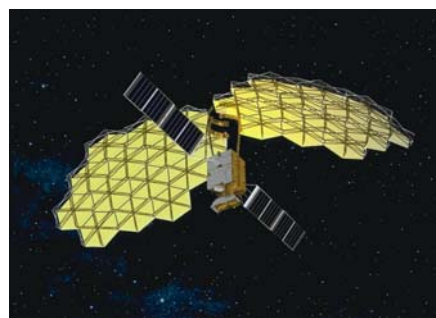
●帯電電位の計測

帯電電位モニタ (Potential Monitor : POM) は衛星構体外部パネルへ搭載して、3種類のサンプルカバーガラスの帯電電位を計測します。音叉変調型の表面電位計(+5kV～-10kV)を使用しています。

●シングルイベント・アップセットの計測

シングルイベント・アップセットモニタ (Single event Upset Monitor : SUM) はメモリに発生するビット反転(ソフトエラー)や回復不能なビット故障(ハードエラー)を検出します。

SUMはTEDA-E内部に実装されています。



きく8号

(写真提供：宇宙航空研究開発機構)

本報は第4巻の技報としてシミュレータに焦点をあてた企画としました。編集にあたり東京大学の須田義大教授に特別寄稿をお願いしたところ、御多忙にも関わらず、快くお引き受けいただきました。稿文には、シミュレータが交通社会に対し、より実利的に深く関わる形で、その持続的発展に寄与していくべきとする先生の理念が表されており、シミュレータメーカーとして励みをいただくとともに社会的責任を再認識し、身が引き締まる思いです。

特別寄稿に続き、シミュレータに関する論文5編を小特集として組み込みました。須田先生の理念に、完全に応え得るものではありませんが、方向性を同じくして事業を展開している当社の姿勢を読み取っていただけるものと考えます。後半には、社会交通システム、宇宙機器、電子精密機器に関する当社のアクティビティを一般論文として収録しました。民需から防衛・宇宙に渡る当社の独自技術をお伝えすることが出来れば幸いです。

技報は単なる技術紹介に留まらず、企業の技量や品格を世に問うメッセージであるという言葉に耳にしたことがあります。本技報の行間に当社がいかにか映し出されているかは皆様の御意見を待つしかありませんが、少なくとも本技報が三菱プレジジョンという企業をご理解いただくのに役立つとともに皆様のご活動の一助となれば幸いです。

今後も年毎の技報の発行をもって当社の技術と製品の紹介を続けてまいりますので、引き続きご愛顧賜りますよう宜しくお願い申し上げます。

2009年5月 技術開発部長
春田健雄 記

三菱プレジジョン技報 編集委員会			
委員長	春田 健雄		
委員	飯島 信幸	竹本 三郎	
	安井 訓	田中 龍一	
	藤井 秀宜	大山 喜彦	
	福井 英登	緒方 正人	
	尼崎 信	間野 正裕	
	阿部 健一	林 房男	
	本庄 広一	練尾 正美	
	鈴木 暢夫	あべ木順一	
	高橋 憲二	浅野 雄三	
	酒井 崇祥	山内 正彦	
	表紙デザイン	佐々木良侍	

三菱プレシジョン技報 Vol.4

©無断転載を禁ず

発行日：2009年5月11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 2-5-7

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：富山 和雄

編集責任者：春田 健雄

印刷所：株式会社三菱電機ドキュメンテクス

〒272-0127 千葉県市川市塩浜 3-12

(非売品)

