

平成17年度  
3次元情報のインタラクティブな  
利用に関する調査研究報告書

平成18年3月

社団法人日本機械工業連合会  
社団法人日本オプトメカトロニクス協会

日機連17先端18

平成17年度  
3次元情報のインタラクティブな  
利用に関する調査研究報告書

平成18年3月

社団法人  
日本機械工業連合会  
日本オプトメカトロニクス協会

平成 17 年 度

3次元情報のインタラクティブな  
利用に関する調査研究報告書

平成 18 年 3 月

社団法人 日本機械工業連合会  
社団法人 日本オプトメカトロニクス協会

## 序

我が国機械工業における技術開発は、戦後、既存技術の改良改善に注力することから始まり、やがて独自の技術・製品開発へと進化し、近年では、科学分野にも多大な実績をあげるまでになってきております。

しかしながら世界的なメガコンペティションの進展に伴い、中国を始めとするアジア近隣諸国の工業化の進展と技術レベルの向上、さらにはロシア、インドなど BRICs 諸国の追い上げがめざましい中で、我が国機械工業は生産拠点の海外移転による空洞化問題が進み、技術・ものづくり立国を標榜する我が国の産業技術力の弱体化など将来に対する懸念が台頭してきております。

これらの国内外の動向に起因する諸課題に加え、環境問題、少子高齢化社会対策等、今後解決を迫られる課題も山積しており、この課題の解決に向けて、従来にも増してますます技術開発に対する期待は高まっており、機械業界をあげて取り組む必要に迫られております。

これからのグローバルな技術開発競争の中で、我が国が勝ち残ってゆくためにはこの力をさらに発展させて、新しいコンセプトの提唱やブレークスルーにつながる独創的な成果を挙げ、世界をリードする技術大国を目指してゆく必要があります。幸い機械工業の各企業における研究開発、技術開発にかける意気込みにかげりはなく、方向を見極め、ねらいを定めた開発により、今後大きな成果につながるものと確信いたしております。

こうした背景に鑑み、当会では機械工業に係わる技術開発動向等の補助事業のテーマの一つとして社団法人日本オプトメカトロニクス協会に「3次元情報のインタラクティブな利用に関する調査研究」を調査委託いたしました。本報告書は、この研究成果であり、関係各位のご参考に寄与すれば幸甚です。

平成 18 年 3 月

社団法人 日本機械工業連合会  
会 長 金 井 務

## は し が き

近年の光学技術、コンピューター技術、情報通信技術の発展の結果、そこで取り扱うことが可能な情報量は日増しに増加の一途をたどっています。特に最先端の現場では、空間的に3次元的な広がりを持った情報に接する機会が増えてまいりました。この情報を産業上有効に利用するためには、それを人間が理解できる形にする必要がありますが、人間は日常的に両目によって3次元的世界を捉えていますので、3次元情報を立体映像として提示すれば、それを瞬時に認識する能力を備えています。しかしながら現状では、3次元情報と人間との双方向コミュニケーション手段は、必ずしも整備されているとはいえません。そこで、今後増加していく各界のニーズに応えるため、3次元情報をインタラクティブに利用するための技術課題への取り組みが必要です。

このような背景と現状をふまえ、当協会は社団法人日本機械工業連合会から研究調査委託を受け、昨年度の「立体映像表示に関する調査研究」をさらに発展させ、「3次元情報のインタラクティブな利用に関する調査研究」を実施しました。当協会内に学識経験者及び産業界の有識者からなる委員会を設置し、委員長には産業界から斯界における第一人者である谷千束氏（アストロデザイン（株）顧問）に就任いただき、より産業現場に近い観点に軸足を置き調査研究を実施しました。現在、最も先進的な取り組みを行っており、また今後も普及、実用化が進むと考えられている製造分野、医療分野に特化して調査研究を実施し、併せて先端立体映像技術開発状況についても分析、検討をしてみました。本報告書の作成にあたられました谷委員長をはじめ委員各位、並びに種々のご指導をいただいた経済産業省、社団法人日本機械工業連合会その他の関係者の皆様方に厚く御礼を申し上げます。

本報告書が機械産業及びオプトメカトロニクス産業の発展に寄与し、関係各位の参考になり大いに活用されますことを期待する次第です。

平成 18 年 3 月

社団法人 日本オプトメカトロニクス協会  
会 長 櫻 井 正 光

## 平成 17 年度 3 次元情報のインタラクティブな利用に関する調査研究委員会委員名簿

委員長 谷 千東 アストロデザイン(株) 顧問／元 NEC 研究所 主席技師  
顧問 本田 捷夫 千葉大学 工学部 情報画像工学科 教授

### 【製造分科会】

主 査 増田 宏 東京大学大学院 工学系研究科  
環境海洋工学専攻・システム創成学科 助教授  
幹 事 山内 真 (独)産業技術総合研究所 光技術研究部門  
光画像計測グループ 主任研究員  
委 員 石川 裕一 三菱自動車工業(株) デザイン本部 デザイン推進部  
エキスパート(デジタル担当)  
委 員 伊藤 貴之 お茶の水女子大学 理学部 情報科学科 助教授  
委 員 滝瀬 和行 (株)アペックス 開発営業部  
委 員 田中 一郎 東京電機大学 工学部 機械工学科  
機械情報システム研究室 教授  
委 員 土居 篤博 富士写真フイルム(株) R&D 統括本部  
機器開発生産本部 機器商品開発センター 主任研究員  
委 員 西田 修造 シャープ(株) 技術本部 技術戦略企画室  
企画グループ 副参事  
委 員 古川 慈之 (独) 産業技術総合研究所  
ものづくり先端技術研究センター システム技術研究チーム 研究員  
委 員 好永 俊昭 辰星技研(株) 技術顧問

### 【医療分科会】

主 査 中郡 聡夫 国立がんセンター東病院 肝胆膵外科 医長  
幹 事 河合 隆史 早稲田大学大学院 国際情報通信研究科 助教授  
委 員 氏家 弘裕 (独)産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門  
マルチモダリティ研究グループ グループ長  
委 員 奥田 茂男 慶應義塾大学 医学部 放射線診断科 助手

- 委員 工藤 正宏 オリジナルメディカルシステムズ(株) 第1開発本部  
内視鏡開発部 マイクログループ 課長代理
- 委員 澤田 一哉 松下電工(株) 新規商品創出技術開発部 照明開発部  
応用システム開発グループ グループ長・主幹研究員
- 委員 関谷 尊臣 ペンタックス(株) R&Dセンター 技術戦略室
- 委員 田上 和夫 九州大学病院 先端医工学診療部 助教授
- 委員 蜂屋 弘之 千葉大学  
フロンティアメディカル工学研究開発センター 教授
- 委員 正宗 賢 東京大学大学院 情報理工学研究科  
知能機械情報学専攻 先端治療福祉工学研究室 助教授
- 委員 望月 亮 (財)NHK エンジニアリングサービス 主任研究員
- 委員 盛川 浩志 早稲田大学 国際情報通信研究センター 助手
- オブザーバー 土居 篤博 富士写真フイルム(株) R&D統括本部  
機器開発生産本部 機器商品開発センター 主任研究員

#### 【先端立体映像技術（アドバンス技術）分科会】

- 主査／幹事 高木 康博 東京農工大学大学院 共生科学技術研究部 助教授
- 委員 石井 源久 (株)ナムコ インキュベーションセンター  
事業開発グループ VT研究チーム リサーチャー
- 委員 圓道 知博 名古屋大学大学院 工学研究科 電子情報システム専攻 助手
- 委員 奥井 誠人 NHK放送技術研究所 テレビ方式 主任研究員
- 委員 末廣 晃也 日本ビクター(株) 技術開発本部  
コア技術開発センター コアユニット 技師
- 委員 平山 雄三 (株)東芝 研究開発センター  
ヒューマンセントリックラボラトリー 主任研究員
- オブザーバー 工藤 正宏 オリジナルメディカルシステムズ(株) 第1開発本部  
内視鏡開発部 マイクログループ 課長代理
- 執筆協力者 堀越 力 (株)NTT ドコモ マルチメディア研究所  
映像信号処理研究室 室長

事務局	松倉 孝男	(社)日本オプトメカトロニクス協会	専務理事
事務局	高岡 孝徳	(社)日本オプトメカトロニクス協会	業務部長
事務局	中野 正人	(社)日本オプトメカトロニクス協会	技術部長

(敬称略、順不同)

## 目 次

序 文

は し が き

委員会名簿

### 第 I 章 序 言

1	はじめに (谷 千束)	1
2	調査概要	2
2.1	委員会の開催状況	2
2.2	報告書の概要 (山内 真)	6
3	第 II 章 製造分野の概要 (山内 真)	7
4	第 III 章 医療分野の概要 (河合隆史)	8
5	第 IV 章 先端立体映像技術の概要 (高木康博)	10

### 第 II 章 製造分野

1	はじめに	12
1.1	背景 (増田 宏)	12
1.2	製造分科会の目的 (増田 宏)	14
2	製造業における3次元情報技術	16
2.1	CAD・CAM (古川慈之・田中一郎)	16
2.2	CAE (伊藤貴之)	23
3	製造業における立体映像利用の可能性	28
3.1	自動車業界 (石川裕一)	28
3.2	プラント業界 (好永俊昭)	36

3.3	エレクトロニクス業界 (西田修造)	45
4	立体映像の先進応用事例 (滝瀬和行)	52
5	製造業における立体映像利用の課題と展望 (山内 真)	59
第Ⅲ章 医療分野		
1	医療分野における3次元映像利用の概要	63
1.1	はじめに (中郡聡夫)	63
1.2	医療における3次元映像利用の現状 (中郡聡夫)	63
1.3	3次元画像の医療分野への応用に関する研究動向 (関谷尊臣)	65
2	医学・看護教育とインフォームド・コンセント	70
2.1	3次元映像を用いた外科手術教育 (河合隆史)	70
2.2	シミュレータを用いた内視鏡外科手術トレーニングの有用性に関する検討 (田上和夫)	75
2.3	インフォームド・コンセント用3次元CGアニメーション (中郡聡夫)	81
3	3次元画像診断と治療支援	85
3.1	CT・MRIからの3次元画像診断 (奥田茂男)	85
3.2	3次元超音波画像 (蜂屋弘之)	89
3.3	3次元内視鏡 (工藤正宏)	93
3.4	3次元画像による手術計画と手術ナビゲーション (正宗 賢)	96
3.5	ハイビジョン立体視ビデオ顕微鏡手術システム (望月 亮)	101
3.6	不安や恐怖の治療用バーチャルリアリティ -VRエクスポージャー (河合隆史)	107
4	3次元画像のユーザビリティと安全性	113
4.1	CT・MRIからの3次元画像構築とバーチャルリアリティ制作 (盛川浩志)	113
4.2	映像による生体影響 (氏家委員)	117
4.3	健康維持・増進、リハビリテーションへの3次元映像の応用 (澤田一哉)	125

5	医療分野における3次元画像利用の課題と展望	(河合隆史・中郡聡夫)	-----	133
第IV章 先端立体映像技術				
1	はじめに	(高木康博)	-----	135
2	従来方式の問題点	(平山雄三)	-----	136
3	空間像方式	(高木康博)	-----	138
4	各種実現方式		-----	141
4.1	インテグラルフォトグラフィ方式	(奥井誠人)	-----	141
4.2	レンチキュラー方式	(石井源久)	-----	143
4.3	パララックスバリア方式	(圓道知博)	-----	145
4.4	プロジェクション方式	(高木康博)	-----	148
4.5	ホログラフィー方式	(末廣晃也)	-----	150
5	研究開発例の紹介 (研究開発機関名称50音順)		-----	153
5.1	インテグラル立体テレビと電子ホログラフィ (NHK)	(奥井誠人)	-----	153
5.2	高密度指向性表示 (東京農工大学)	(高木康博)	-----	156
5.3	1次元インテグラルイメージング方式 (東芝)	(平山雄三)	-----	158
5.4	Seelinder (名古屋大学)	(圓道知博)	-----	161
5.5	フラクショナル・ビュー方式 (ナムコ)	(石井源久)	-----	163
5.6	インテグラル表示システム (日本ビクター)	(末廣晃也)	-----	165
6	アプリケーション展開		-----	168
6.1	産業応用	(平山雄三)	-----	168
6.2	医療応用	(高木康博)	-----	169
6.3	放送応用	(奥井誠人)	-----	172
6.4	モバイル応用	(堀越 力)	-----	174
6.5	アミューズメント応用	(石井源久)	-----	176
6.6	教育応用	(圓道知博)	-----	178
6.7	広告応用	(末廣晃也)	-----	181

7	今後の研究開発	184
7.1	表示デバイス (平山雄三)	184
7.2	画像合成 (石井源久)	187
7.3	圧縮 (圓道知博)	189
7.4	記録・通信 (高木康博)	192
7.5	3次元画像入力 (奥井誠人)	194
7.6	光学デバイス (末廣晃也)	196
8	将来の展望 (高木康博)	199
第V章 結言 (幹事会代表 山内 真)		
	結言	201

(敬称略)

## 第 I 章 序 言

1	はじめに	1
2	調査概要	2
3	第 II 章 製造分野の概要	7
4	第 III 章 医療分野の概要	8
5	第 IV 章 先端立体映像技術の概要	10

# 第 I 章 序 言

## 1 はじめに

本調査研究活動は、昨年度に行われた「立体映像表示に関する調査研究」（本田捷夫委員長）の継続発展版として企画されたもので、昨年度版が立体表示に関する技術、利用分野などを広範囲全般にわたって調査を行った事に対し、本年度は分野を主要なものに絞って深く調査研究することを主方針とした。即ち、立体映像情報の基盤となる 3 次元情報の 2 次元画面での活用も含めて、3 次元情報／立体視化情報のインタラクティブ（能動的：ユーザーが映像を見ながら映像内容进行操作できる機能）な利用が非常に有効と推察され、且つ実用化・普及が強く期待されている製造分野および医療分野に特化して現状、課題について詳しく調査分析し、今後の展望に関しても洞察を試みることにした。また、3 次元情報を立体視化する立体表示技術に関しても、両眼視差方式の弱点を解消するより自然で正確な立体表示を可能にする新しい先端技術開発状況についても詳細に調査し、今後のあるべき開発方向についての示唆を与えうる展望を呈示できるよう努めることにした。

従って委員会は、第 I 章・調査概要節の記載のように、製造分科会、医療分科会、および先端立体映像技術（アドバンス）分科会の 3 分科会構成とし、各分科会主査のリーダーシップの元に分科会毎に調査研究を推進した。本報告書の内容構成は、分科会毎の調査結果に対応して第 II 章、第 III 章、および第 IV 章に分けて記載し、全体に共通する現状、課題、および展望に関しては最終章にまとめるものとした。

本調査研究結果を敢えて端的に要約すると、該当分野における 3 次元情報のインタラクティブ利用に対するニーズ、期待は大きく、実用開発も普及に向けて着実に進展している一方、3 次元情報を立体視化して活用する次のステップに関しては、コスト問題も含めて幾つかの重要技術課題が存在し、スムーズな進展の足かせになっている事も浮き彫りにされたと言える。これらの課題解決に対する望ましい技術開発方向の具体的中身に関しては、委員会内で考察・議論を徹底的に行う時間的余裕が不足したこともあって十分な呈示には至らなかった面があるが、読者各位におかれては本報告書が示唆するところを汲み取って頂き、今後の技術／事業開発の一助にして頂ければ幸いである。

立体視にまで進化させた 3 次元情報のインタラクティブな活用が近い将来実現してくれば、既存産業／事業の一層の発展に寄与するばかりでなく、立体映像関連の巨大な新産業が創出されることになり、日本産業／社会の新たな活性化・発展に大きく貢献することを期待して、本報告書を上梓する次第である。

## 2 調査概要

### 2.1 委員会の開催状況

本調査は、平成 17 年 6 月 20 日付けで、社団法人日本機械工業連合会から社団法人日本オプトメカトロニクス協会が委託を受け実施したものである。

調査の実施にあたっては、協会内に「3 次元情報のインタラクティブな利用に関する調査研究委員会」（委員長・谷 千束 アストロデザイン株式会社 顧問）を設置し調査を実施した。

本委員会の開催、検討状況は、次のとおりである。

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| 第 1 回幹事会                    | 平成 17 年 6 月 23 日（木） <ul style="list-style-type: none"><li>・ 調査内容の大枠について</li><li>・ メンバー構成（案）について</li><li>・ 第 1 回本委員会の進め方について</li></ul>                         |
| 第 1 回委員会                    | 平成 17 年 7 月 14 日（木） <ul style="list-style-type: none"><li>・ 委員紹介</li><li>・ 本委員会の趣旨、調査概要説明</li><li>・ 各分科会の内容説明</li><li>・ 今後の調査の進め方及び報告書原稿の書き方等に関する説明</li></ul> |
| 第 1 回製造分科会／医療分科会／アドバンス技術分科会 | 平成 17 年 7 月 14 日（木） <ul style="list-style-type: none"><li>・ 調査内容の大枠について</li><li>・ 執筆分担について</li><li>・ 第 2 回分科会の進め方について</li></ul>                               |
| 第 2 回アドバンス技術分科会             | 平成 17 年 9 月 8 日（木） <ul style="list-style-type: none"><li>・ 調査項目の確認</li></ul>  |

- ・ 報告書の執筆担当者割り当てについて
- ・ 今後のスケジュールについて

## 第 2 回製造分科会

平成 17 年 9 月 21 日（水）

- ・ 講演「立体映像の基礎と技術動向」  
（千葉大学 本田捷夫）
- ・ 工場見学「株式会社アペックス」
- ・ 調査項目の確認
- ・ 報告書の執筆担当者割り当てについて
- ・ 今後のスケジュールについて

## 第 2 回医療分科会

平成 17 年 9 月 29 日（木）

- ・ 講演「CT、MRI からの 3 次元画像構築とバーチャルリアリティ制作」  
（早稲田大学 盛川浩志）
- ・ 講演「3D 内視鏡開発の現状」  
（オリンパスメディカルシステムズ(株) 工藤正宏）
- ・ 調査項目の確認
- ・ 報告書の執筆担当者割り当てについて
- ・ 今後のスケジュールについて

## 第 3 回製造分科会

平成 17 年 11 月 7 日（月）

- ・ 報告書内容の審議
- ・ 調査報告書の目次構成と各担当者執筆内容について
- ・ 今後のスケジュールについて

## 第 3 回アドバンス技術分科会

平成 17 年 11 月 8 日（火）

- ・ 見学「株式会社ナムコ」
- ・ 調査報告書の目次構成と各担当者執筆内容について
- ・ 今後のスケジュールについて

### 第 3 回医療分科会

平成 17 年 11 月 10 日（木）

- ・ 講演「現行手術用顕微鏡の問題点とハイビジョン立体視ビデオ顕微鏡手術システム」  
（(財)NHK エンジニアリングサービス 望月 亮）
- ・ 講演「超音波診断における三次元画像」  
（千葉大学 蜂谷弘之）
- ・ 講演「医療現場における 3D 画像活用の現状」  
（慶応大学 奥田茂男）
- ・ 講演「立体アニメーション OpeAnime によるインフォームドコンセント」  
（国立がんセンター 中郡聡夫）
- ・ 調査報告書の目次構成と各担当者執筆内容について
- ・ 今後のスケジュールについて

### 第 2 回幹事会

平成 17 年 11 月 28 日（月）

- ・ 各分科会の活動状況中間報告
- ・ 報告書の全体調整について
- ・ 今後のスケジュールについて

### 第 4 回製造分科会

平成 17 年 12 月 19 日（月）

- ・ 第2回幹事会の報告
- ・ 報告書内容の審議
- ・ 報告書原稿の書き方確認及び原稿締切日について
- ・ 今後のスケジュールについて

### 第 4 回アドバンス技術分科会

平成 18 年 1 月 13 日（金）

- ・ 第2回幹事会の報告
- ・ 報告書原稿の書き方確認及び原稿締切日について
- ・ ロードマップの検討
- ・ 今後のスケジュールについて

第 4 回医療分科会

平成 18 年 1 月 26 日（木）

- ・ 講演「立体映像における生体安全性」  
（(独)産業技術総合研究所 氏家弘裕）
- ・ 講演「VR シミュレータを用いた内視鏡外科手術の教育の  
現状とその有用性に関する検討」  
（九州大学 田上和夫）
- ・ 講演「医用断層画像オーバーレイ表示システム」  
（東京大学 正宗 賢）
- ・ 報告書原稿の書き方確認及び原稿締切日について
- ・ 今後のスケジュールについて

第 3 回幹事会

平成 18 年 2 月 16 日（木）

- ・ 報告書原稿の査読
- ・ 最終原稿の締切日について
- ・ 第 2 回本委員会の進め方について

第 2 回委員会

平成 18 年 3 月 31 日（金）

- ・ 調査報告書全体の調査結果に関する報告について
- ・ 各分科会の調査結果報告について

（敬称略）

## 2.2 報告書の概要

本調査研究では、3次元情報の利用に関する調査方針として、

- ① 立体映像で観察することに重点をおきつつ、3次元コンピューターグラフィクスによる観察を含めること。
- ② 対象とする産業分野を製造分野と医療分野に重点化すること。
- ③ 立体映像表示技術の調査は、現在研究が進行中であり、先端的で将来性の高い方式のものを重点的に調査すること。
- ④ 3次元情報と人との関わり方にインタラクティブ性があるものを主体とすること。

の4つを掲げた。これに基づいて本調査研究では3つの分科会がそれぞれ活動を行い、製造分科会が第II章製造分野、医療分科会が第III章医療分野、アドバンス技術分科会が第IV章先端立体映像技術の執筆を担当した。各項目の執筆者は目次に記した通りであり、ほとんどの部分を各分科会委員が執筆したが、一部オブザーバー及び執筆協力者に原稿を依頼した部分がある。

具体的には第II章では製造分野におけるCAD・CAM・CAEによってどのような3次元情報が生成されるのか、またその3次元情報が自動車業界、プラント業界、及びエレクトロニクス業界においてどのように利用されているのかを記述すると共に、具体的事例を報告する。第III章では医学教育、医療現場における診断と治療支援、及び健康の維持・増進に関して、医療分野での様々な3次元情報の利用状況と研究動向について報告する。第IV章では、先端的な立体映像表示技術である空間像方式について、従来方式との比較、想定される応用展開での将来展望、及び周辺技術に関して調査した結果をまとめて報告する。

なお、本報告書に挿入されている図面の中で、原図面がカラーのものを白黒印刷としたため、多少見づらくなっているものがあることをご容赦願いたい。本報告書の電子版が(社)日本機械工業連合会 <http://www.jmf.or.jp>、及び(社)日本オプトメカトロニクス協会 <http://www.joem.or.jp> のホームページに掲載されており、自由にダウンロード可能となっている。電子版では原図面のままカラーで掲載されているので、合わせてご利用いただくと幸いである。

### 3 第Ⅱ章 製造分野の概要

製造分野で利用される 3 次元情報は主として、製品そのものの幾何学的形状、製品を製造するために必要な情報、及び製品の機能をシミュレーションするための情報があり、それぞれ 3 次元計算機援用設計／製造／エンジニアリングツール（3DCAD／CAM／CAE）によって生成される。一口に 3 次元情報と言っても、その内容はそれぞれ異なっている。そこで本章ではまず、

**2 節**「製造業における 3 次元情報技術」において、これらツールの目的と役割、データの内容、及び立体映像利用のシナリオ等について詳細に検討する。

3DCAD は主に製品設計段階で使用されるツールであり、製品の形状を表す 3 次元情報が生成される。そしてその形状を立体的に観察するために、ワイヤフレーム、サーフェスモデル、ソリッドモデル等が利用される。設計された 3 次元情報は、製品の試作（クレイモデル、モックアップ）によって確認され、修正を繰り返して決定されるが、立体映像による観察を利用することにより、この試作サイクルを迅速化することが可能となる。

3DCAM では、製品をどのように作り出すかという問題を解決するための情報が生成される。ここでの 3 次元情報は、製品そのものの情報ではなく、例えば製品を加工するための工具の移動経路といった情報となる。したがって 3DCAM は、生産設計、あるいは生産準備の段階で多く使用される。3DCAM で生成される 3 次元情報は 3DCAD で生成された 3 次元形状情報を基にしているが、その変換作業は完全には自動化されていない。

3DCAE では、設計に関連した構造強度や熱流体解析などのシミュレーション計算が行われる。その作業はやはり 3DCAD で設計された 3 次元形状情報に基づいて行われるが、シミュレーション用の形状モデルを作成するためのメッシュ分割作業は自動化が難しく、立体映像の観察を通じた対話的な操作が有効と考えられる。シミュレーション結果を視覚的に理解するために、立体映像表示が用いられる。

**3 節**「製造業における立体映像利用の可能性」では、製造業の代表として自動車業界、プラント業界、エレクトロニクス業界の 3 つについて、立体映像利用の現状及び将来展望、立体映像表示技術に対する要望等についてまとめた。

自動車業界では、意匠設計と販売促進（プロモーション）で 3 次元コンピューターグラフィクスが多く用いられており、今後立体映像の利用が可能になれば、より活用が進むと考えられる。意匠設計初期段階では、解像度と操作性への要求レベルが高く、最終段階では奥行き再現精度への要求レベルが高まる。プロモーション用途においては、立体映像への要求レベルはそれほど高くない。現状では、意匠設計初期段階とプロモーション用途に

において立体映像利用が始まっている。今後は、個人差なく車体のサイズ感を得られるような立体映像表示システムの開発が望まれる。

プラント業界では大規模な設備を設計する必要があり、比較的早くから 3DCAD システムが開発され、利用されてきた。またプラント改造時等に、現状設備をレーザースキャンによって寸法測定することによっても 3次元情報が得られる。設計された 3次元情報を立体的に観察するため、これまでは縮小模型であるプラントモデルエンジニアリングが広く用いられてきたが、最近では実模型の代わりに立体映像が利用されている。またプラントのメンテナンスにおいても立体映像の利用が検討されている。プラント業務は多くの関係者が参加することから、総合調整や協調作業にも立体映像の利用は有効と考えられる。

エレクトロニクス業界では、企画設計から販売、リサイクルに至るまで一連の流れを統合管理しており、またその範囲も全世界的である。現在、デジタルエンジニアリングと呼ばれる 3次元情報技術の導入が図られている。デジタルエンジニアリングでは 3次元情報を様々な場面で利用することが想定され、現状では立体映像表示の利用例はほとんどないものの、今後の活用が見込まれる。

製造業における立体映像の利用例を、4節「立体映像の先進応用事例」においていくつか紹介する。ボリューム感を出す表示のため、設計された製品形状を原寸大で立体視可能なシステムが開発されている。また立体映像によるデジタルモックアップにより、製品開発期間の短縮によるコストダウンが図られている。バーチャル・リアリティ技術を利用したショールームのテストで、成約率が上昇することが示された。

最後に、5節「製造業における立体映像利用の課題と展望」についてまとめた。製造業では、すでにどの業種においても 3次元 CAD システムが導入されているが、普及の程度は業種により違いがある。製造業における立体映像利用の課題は、コストとの兼ね合いと、現状の立体映像表示が要求レベルを満たしていないことである。今後は 3次元 CAD システムによるデジタル化が進んでいる業界から、立体映像の利用が進むと予測される。

#### 4 第Ⅲ章 医療分野の概要

近年の医療分野においては、CT、MRI、超音波検査データを基にした 3次元画像診断、3次元内視鏡、バーチャル内視鏡、放射線治療計画・手術支援用の 3次元画像、そして強化現実感による手術ナビゲーションなど、3次元画像の応用にかかる各種研究開発や試験的導入が行われている。3次元画像は、血管や臓器の形状や構造、位置関係をイメージしやすく、直感的に分かりやすいという性質を有しているために、学生・研修医・看護師の

教育や患者への説明（インフォームドコンセント）などにも応用されている。一方で、医療の現場で3次元画像を活用する上で、コンテンツ制作に要するスキルをはじめ、制作・呈示環境のコストや整備など、多くの課題も存在する。

第Ⅲ章では、医療分野における3次元画像の利用にかかる、さまざまな取り組みについて述べるとともに、その課題や展望について言及した。その多くは、各委員自身が携わったものであり、具体性の高い内容となっている。以下に、第Ⅲ章の概要を紹介する。

**1 節**では、医療分野の中で、医学・看護教育と患者への説明、診断・治療支援などにおける、3次元画像の利用の現状について概観した。

**2 節**は「医学・看護教育とインフォームドコンセント」と題し、外科手技教育、内視鏡外科手術トレーニング、インフォームドコンセントにおける3次元画像の利用事例を、それぞれ紹介した。

**3 節**は「3次元画像診断と治療支援」と題し、まず、CT・MRI、および超音波を用いた3次元画像構築について紹介した。これらは診断を目的とした、3次元画像処理に関する最新の研究開発事例である。次に、3次元内視鏡、強化現実型ナビゲーションシステム、ハイビジョン品質の3次元顕微鏡手術システムについて、紹介した。これらは治療支援を目的とした、3次元画像システムの開発事例として位置づけられる。さらに、バーチャルリアリティを用いたパニック障害の治療システムを紹介した。これは、患者が体験する恐怖場面のシミュレータであり、心療内科や精神科の領域における3次元画像のインタラクティブな利用事例である。

**4 節**は「3次元画像のユーザビリティと安全性」と題し、まず、CT・MRIからの3次元画像構築にかかる制作プロセスの概要や課題点などについて紹介した。次に、3次元画像を利用する上で注意を要する、生体影響について紹介した。3次元画像において特徴的な影響は、映像酔いと眼精疲労があげられ、これらにかかる研究事例等について述べた。

さらに、健康維持・増進、リハビリテーション用途での研究事例や実用化事例について紹介した。

**5 節**は「医療分野における3次元画像利用の課題と展望」と題し、上述の事例における課題を3次元画像の利便性、有効性という2つのカテゴリに分類・整理し、今後の3次元画像の利用を展望するための提言を行った。

## 5 第IV章 先端立体映像技術の概要

第IV章では、将来の3次元情報のインタラクティブな応用で重要になると考えられる将来の3次元ディスプレイ技術について、アドバンス技術分科会で調査を行った内容についてまとめた。本調査報告書では、3次元情報の主な応用分野として製造分野と医療分野について調査を行っているが、残念ながら、現状ではそれほど利用が進んでいる状況ではない。これは、従来の3次元ディスプレイのもつ眼精疲労の問題、解像度低下の問題、インフラ技術の不在、コストの問題などによるものであると考えられる。将来的により自然で高解像度な3次元ディスプレイが低価格で供給されるようになれば、これらの分野を始めとして一気に普及することが予想される。このような将来の3次元ディスプレイ技術について調査した。以下に、第IV章の概要を述べる。

**2節「従来方式の問題点」**では、従来の2眼式や多眼式の3次元ディスプレイのもつ問題点について調べた。調節と輻輳の不一致、視点が限られる、なめらかな運動視差がないなどの直接的問題点とその原因、派生する問題点として逆視の発生、画像飛びなどについてまとめた。

**3節「空間像方式」**では、2眼式や多眼式の問題点を解決する新しい表示方式について取り上げた。実際には各所で独自に研究開発が進められているが、ここでは「空間像方式」という言葉でまとめた。従来の2眼式や多眼式では、右眼用と左眼用の画像を表示するという考え方を採用しているのに対して、光線の進行方向を直接制御して3次元像を表示するという考え方を採用している。空間像方式では、光線の進行方向をどれだけ細かくサンプリングするか、別の言い方をすれば光線数が重要になるが、滑らかな網膜像形成が得られるための角度ピッチ、さらに調節と輻輳矛盾が起こらないための角度ピッチについて示した。

**4節「各種実現方式」**では、空間像方式を実現するために用いられる3次元ディスプレイの実現方式についてまとめた。具体的には、水平視差と垂直視差を有するが表示デバイスに高い性能を要求するインテグラルフォトグラフィー方式、視差は水平方向に限定されるが表示デバイスに対する要求が緩和されるレンチキュラー方式、パララックスバリア方式、プロジェクション方式、さらに表示デバイスに対する要求は非常に厳しいが理想的な表示方式と言われ光の波面を制御するホログラフィー方式について調べた。それぞれの方式の原理、長所と短所についてまとめた。

**5節「研究開発例の紹介」**では、最近の代表的な研究開発事例を紹介した。NHKのインテグラル立体テレビと電子ホログラフィー、東京農工大学の高密度指向性表示、東芝の1次元インテグラルイメージング方式、名古屋大学の Seelinder、ナムコのフラクショナル

ル・ビュー方式、日本ビクターのインテグラル表示システムの研究開発状況（組織名 50音順）について調べた。それぞれ異なる目的で異なる立場で研究開発が進められているが、国内を代表する空間像方式である。

**6 節「アプリケーション展開」**では、空間像方式は、眼精疲労がなく長時間の利用が可能で、メガネなしで観察位置が限定されないなどの優れた特徴があるので、実用化されればさまざまな分野で利用が進むことが予想される。そこで、産業、医療、放送、モバイル、アミューズメント、教育、広告の7分野について、空間像方式がどのように利用されるか、空間像方式が新たに可能にするアプリケーションについてまとめた。さらに、可能であれば将来の市場規模についても見積もった。

**7 節「今後の研究開発」**では、空間像方式を実用化するために必要になるさまざまな要素技術について調べた。空間像方式では光線を詳細に制御するため、超高精細な表示デバイスが必要になるが、デバイスに要求される性能、3次元用に特化したデバイス開発について述べた。また、表示する画像情報が膨大になるため、リアルタイムで画像合成する技術が必要になるが、これを可能にするコンピューターグラフィックス技術について調べた。さらに、膨大な画像データの圧縮方式と、最近のMPEG等での標準化の状況について調べた。また、空間像方式に必要とされるデータ帯域と記録容量について調べ、次世代光ディスクや放送、インターネットのデータ帯域との比較を行った。実写を記録するためには3次元カメラ技術が必要になるが、この研究開発の状況について調べた。また、空間像方式で光線方向の制御を行う光学デバイスに関する課題と最新技術について述べた。

**8 節「将来の展望」**では、空間像方式の実用化時期について予測した。具体的には、表示デバイスの画素数の伸びとCPUの処理能力の伸びをもとに予測を行った。その結果、2020年頃には水平視差方式でハイビジョン並みの画質のもつ3次元ディスプレイが実現され、水平・垂直視差方式の実現は2020年以降になるという予測が得られた。

最後に、将来の3次元ディスプレイに関する第IV章の調査を終えて感じたこととして、空間像方式はまだ研究開発が始まったばかりの技術であり、要素技術に関する課題と可能性は見えてきているものの、異なる学会で散在した形で議論がなされているなど、全体として統一感に欠けている。今後は、より総合的かつ包括的な研究開発が必要であり、将来の課題を明らかにして、研究開発をより一層加速する必要があると思う。一方で、2006年度から総務省で「ユニバーサルコミュニケーション技術」に関する研究開発が開始されることが決まり、3次元ディスプレイに関する研究開発も重要なテーマに挙げられている。また、映像情報メディア学会で3次元映像技術を専門に扱う研究会が設立される。まさに、空間像方式の研究開発の推進には好機であり、今後の研究開発の発展に期待したい。

## 第Ⅱ章 製造分野

1	はじめに	12
2	製造業における3次元情報技術	16
3	製造業における立体映像利用の可能性	28
4	立体映像の先進応用事例	52
5	製造業における立体映像利用の課題と展望	59

## 第Ⅱ章 製造分野

### 1 はじめに

#### 1.1 背景

製造業は、物理的な実体をもつ製品を消費者に提供する産業であるが、製品が市場に出るまでには、実に多くの過程が存在する。実際の製品開発では、企画、意匠設計、概念設計、詳細設計、生産設計などを経た後に、リアルなモノ作りへと至る。その過程でやり取りされるのは実際のモノではなく、モノに関する情報である。その意味では、製品設計とは、どのようなモノをどのような手順で作るかに関する情報を作り出す行為であるということができる。

従来の製品設計では、製品情報の創出を行うために現物の模型を作成し、試行錯誤を繰り返すことが多かった。また、製品情報の伝達には図面を利用していたが、図面には解釈が必要であり、設計者は図面を見て製品の3次元的な姿をイメージしながら、干渉等の不具合検討を行っていた。

しかし、そのような開発手法では高品質な製品を短期間に作り出すという市場要求に応えることに限界がある。近年、消費者の嗜好が多様化し、製品寿命が短くなっているといわれる。さらに市場がグローバル化しており、異なる地域の市場に対応するために、生活スタイルや価値観が微妙に異なる消費者のニーズに応じていかなければならない。こうした状況は、必然的に製品開発の短期間化への要求に結びついていく。

既に述べたように、製品設計の本質は設計情報の創出にある。したがって、製品情報が3次元データとして記述されていれば、実物の作成を行うことなく、様々な検討を行なって設計を進めていくことができる。原理的には、生産の直前まで、製品をデジタル情報として扱うことが可能である。経済合理性の観点からは、実物よりもデジタル情報で検討を行ったほうが開発期間の点でもコストの点でも有利である。

製品設計に3次元データを用いる試みは1960年代から研究が続けられてきた。その後、3次元データによる設計は徐々に浸透していったが、爆発的に普及したのは90年代に入ってからである。その結果、製造業の多くの分野で、図面による設計から3次元データによる設計への変革が起こってきた。現在では、設計の主たるアウトプットは、図面ではなく、3次元データとなりつつある業種も多い。3次元データを入力とすることで、部品の干渉計算、さまざまな性能解析、レンダリングなど、数多くのシミュレーションツールが開発

されてきた。

その一方で、計算機による自動計算になじみにくい検討項目も残っている。スタイリングなどの感性を必要とする検討項目、微妙なノウハウに基づく設計、また、多人数での多角的な設計検討や作業手順の教育など、人の知覚や理解、認識などに基づく暗黙的なプロセスは、計算機による自動処理だけで完結させることはできない。そうした状況をもデジタル情報によって効率的に行うためには、人がデジタル情報を知覚する能力を強化するためのツールが必要となる。

人とデジタル情報の接点は、現状では、主としてディスプレイや印刷物である。しかし、計算機の内部データが3次元であったとしても、出力媒体は2次元のままであった。そのため、人は頭の中で2次元画像を解釈し3次元情報を再構成することが必要となっていた。

しかし、2次元画像の解釈によって奥行きを正確に知覚することは一般には難しい。奥行き情報の知覚には画像の輝度情報が利用されるが、輝度は光源の形状や距離、物体の反射特性や光の反射など多くのパラメータの複雑な相互作用の結果生み出されるものなので、そこから奥行き情報を求めるのは単純ではない。さらに、輝度を忠実に計算するレンダリングは計算時間がかかるため、製造業においては、意匠部門以外では簡易レンダリングで済ましてしまう場合がほとんどである。その場合、物体形状の奥行きを正確に把握することは非常に困難となる。そうした事情から、奥行き感を正確に把握することが必要な場面では、3次元データが存在する場合であっても現物の立体模型が作成されてきた。

立体映像装置は、そうした場面で最も適したソリューションの一つであり、3次元データを忠実に人に伝達するための有力な手段となりうる。人には左右の目から入力された異なる画像をリアルタイムに処理して、奥行きを認識する能力が生来的に備わっている。この能力を活用するメカニズムを提供することで、特別なトレーニングを行わなくても、実世界における人の知覚をデジタル情報から再現できるようになることが期待できる。

製造分野は、立体映像装置の潜在ニーズが大きいと考えられる。実際、製造業において、3次元データによって表現された情報を人に転写することが重要となる場面は多い。

第一に、意匠設計が挙げられる。今日の市場では機能による差異化が以前よりも難しくなっているため、デザインが製品の売れ行きを左右することが多くなっている。デザインは感性による部分が大きいため、その評価を自動化することは困難であり、人の感性に頼らなければならない。そのため、これまでは時間とコストが許す範囲で実物の模型が作られてきた。立体映像装置を用いることで正確な意思決定が行えるようになれば、手間とコストのかかる模型製作の手間が省け、より多くのデザインを検討できるようになる。そうすれば、低コストで高品質なアウトプットを短期間で創出することが期待できる。意匠

設計は、立体映像装置のニーズが最も高い分野の一つといえよう。

第二に、情報伝達と情報共有の高精度化が期待できる。製品開発には非常に多くの部門やメンバによってなされるものなので、異なる専門性をもつ多数のメンバ間で適切な情報共有や伝達が行われなければならない。設計の不具合や改善点を指摘するためには多くの専門知識や経験が必要であるため、自動化は困難であり、一旦は専門家が設計情報を理解しなければならない。図面から3次元データに変わったことで、情報伝達にかなりの改善がなされたが、2次元画像から得られる情報には限界がある。立体映像を用いることで、実物を前にしたような正確な情報伝達・共有が可能になるならば、設計検討の質がさらに向上することが期待できる。

第三に、従業員教育への応用が考えられる。最近では、作業工程をモデルベースで検証するためのツールが充実してきているため、そのデータをトレーニング教材として有効活用することが期待できる。この場合も、3次元情報を確実に作業者に伝達することが必要となるため、立体映像装置は有効な支援ツールとなりうると考えられる。

## 1.2 製造分科会の目的

製造分科会は、製造分野における立体映像装置の応用可能性について調査を行うことを目的としている。一般に技術の価値は、利用するコンテキストに依存する。本分科会では、このことを強く意識して、製造業の現状分析にウェイトを置いて調査を行うこととした。

ただし、製造分野といっても業種ごとに異なる業務プロセスとニーズを持っており、一概に論じることはできない。また、製造業の現場を知っているエンジニアがまだ普及しているとはいえない立体映像技術について多くを知っていることも期待できない。

そこで、製造分科会を複数の異なる専門性を持つメンバから構成することとし、立体映像装置に関する講義や見学会、メンバ相互の業務紹介などを通じて、情報共有を進展させることに努めた。その上で、立体映像技術の応用可能性について、以下の四つの視点から検討を行った。

- (1) 既に広い範囲の製造業で用いられている CAD/CAM/CAE システムとの関連で立体映像装置を利用することを想定した場合の応用可能性
- (2) 特定の業種に限定し、実際の製品開発プロセスで立体映像装置を利用するための必要要件、想定される利用場面、現状の立体映像技術の問題点等の調査
- (3) 現時点での立体映像装置の先進応用事例調査
- (4) 製造分野での普及に向けた立体映像技術の課題と展望の調査

これらの多角的な視点から検討を加えることによって、製造分野における立体映像装置の可能性について調査を進めていくこととした。

CAD/CAM/CAE は、3次元データを扱うツールとして、製造業では広く分野横断的に利用されている。CADでは製品の3次元データの作成を行い、CAMでは3次元データを入力としてNC加工データを生成する。また、CAEは3次元データからメッシュなどの離散モデルを作り、現実世界での振舞いを予測する計算を行う。また、CAEの結果は可視化ツールによって、2次元画像やアニメーションなどに加工されて設計者に伝達される。これらのツール群の出力は、立体映像装置への入力データとして利用できる。立体表示装置は、これらのツールの効果や使い勝手を強化することによって、製品設計、生産設計、性能解析の支援を行っていくことが期待できる。

一方、立体映像装置は、人と3次元データとの接点を支援するツールであるため、目的の異なる既存ツールとの関連だけで考えるのは不十分である。立体映像装置へのニーズを広く汲み上げていくためには、設計製造のプロセスを踏まえ、その中での利用可能性を考えていく必要がある。そこで業種として、自動車業界、プラント業界、エレクトロニクス業界を選択し、応用可能性の調査を行うこととした。これらの業種は、設計製造のプロセスがかなり異なっているため、多様な応用可能性を検討する上で適していると考えられる。また、市場規模が大きく、情報化投資も十分になさされていて3次元コンテンツが豊富に存在することから、立体映像装置の応用を検討する対象として好ましいと思われる。

また、立体映像技術の現状を調べるために、先進ユーザの事例調査を行うこととした。現状においては、立体映像装置は、まだ製造分野での要求水準を十分に満たしているとはいえず、実際の業務で利用している事例はまだ一部に限られているようである。そうした状況は技術が黎明期から成熟期へと至るテクノロジーライフサイクルの初期段階では典型的に観察される。その意味では、製造支援ツールとしての立体映像技術はまだ初期段階にあるということが出来るが、その段階においては、先進ユーザ事例は将来のニーズを先取りしていることが多いことがしばしば指摘されている。そこで、現状において先進ユーザにはどのような業種が含まれていて、どのような目的に利用しているのかを調査することで、今後の技術の展開を考える上での有益な情報が得られると思われる。

本分科会では、最後に、以上の報告を踏まえて、立体映像技術を製造業に普及させるために、どのような技術課題を解決していかなければならないかについて考察を行った。

本分科会での報告を通じて、製造業に特有なニーズに関して、立体映像技術によって何がどこまで可能になるのか、何が解決できればさらなる展開が期待できるのかに関して、多少なりとも有益な指針が提供できれば幸いである。

## 2 製造業における 3次元情報技術

### 2.1 CAD・CAM

#### 2.1.1 製造業における CAD・CAM と製品ライフサイクル

工業製品を生産して販売・流通させるためには多くの情報を管理する必要がある。その中で代表的なものを挙げるとすれば、製品そのものを構成するための情報と生産するための情報の二種類である。製品そのものを構成するための情報（製品情報）とは、その製品がどのような形と機能を持っていて、その形や機能を実現するためにどのような材料をどのような寸法で加工および組み合わせるか等の情報である。また、生産するための情報（生産情報）とは、製品を構成する材料を指定された寸法で加工または組み合わせるといふ作業をどのような手段で実現するかという情報を指す。このような情報を一から作り上げていく作業を設計と呼び、設計を計算機によって支援するシステムを CAD（Computer-Aided Design）と呼ぶ。一方、CAD で作られた情報（データ）は当然何らかの形で生産に利用されるが、データを生産に直接使用して計算機によって生産を支援するシステムを CAM（Computer-Aided Manufacturing）と呼ぶ。工業製品は現実存在するモノであるため、CAD・CAM で扱う情報の中心は現実存在するモノの情報、つまり 3次元空間における形・位置・材質等の情報となる。

本項（2.1 CAD・CAM）では、CAD・CAM を中心とした製造業における 3次元情報技術について解説し、CAD・CAM というシステム側から見た立体映像表示の可能性について述べる。そのために、ここでは CAD・CAM で扱われる 3次元情報について解説し、製品のライフサイクルにおける CAD・CAM の位置付けについて述べる。

工業製品の伝統的な設計方法は、製品の情報が細かく定義された図面を中心に行われてきた。そのため、初期の CAD の多くは図面の作成支援システムであると言っても良い。その後、単なる図ではなくモノの厳密な表現に近づいた 3次元 CAD へと進化してきた。その発展の過程で、3次元 CAD における情報表現形式が数多く提案されている。

図面（図 2.1-1(1)）に書かれた図を 3次元空間内の線に置き換えたものでも、モノの形としての表現はある程度可能である。このような表現をワイヤフレームモデル（図 2.1-1(2)）と呼ぶ。ワイヤフレームモデルでは、製品形状の特徴的な線のみで製品を表現していると言える。ワイヤフレームモデルでは、特徴的な線以外の形は厳密に定義されていないため、複雑な曲面形状などは表現できない。この問題を解決するために、製品

形状を構成する面を厳密に定義する表現が考えられた。このような表現をサーフェスモデル（図 2.1-1(3)）と呼ぶ。この場合のサーフェスとは、厚さのない板状の要素の集まりでモノの表面を定義したものあり、物体の内部と外部の区別がない。その後、実際のモノをより厳密に表現するために、サーフェスで隙間なく囲まれた部分空間を定義して物体を表現する方法が考えられた。このような表現をソリッドモデル（図 2.1-1(3)）と呼ぶ。ただし、図 2.1-1に示すように、モデルを 3 次元 CG で表示する限りにおいては、サーフェスモデルとソリッドモデルに大きな違いはない。

ソリッドモデルが導入されたことで、材料の属性を指定して部品ごとの重量計算が自動的に出来るようになるなど、CAD に 3 次元情報を導入する利点が増えた。その一方で、製品情報がある程度固まった段階ではソリッドモデルで厳密に表現することの利点があるが、設計の対象や過程によってはソリッドよりもワイヤフレームやサーフェスで作業した方がよい場合もある。このため、単一の表現方法を用いるというよりも、これらを混在させた形状表現が現在では多く用いられている。

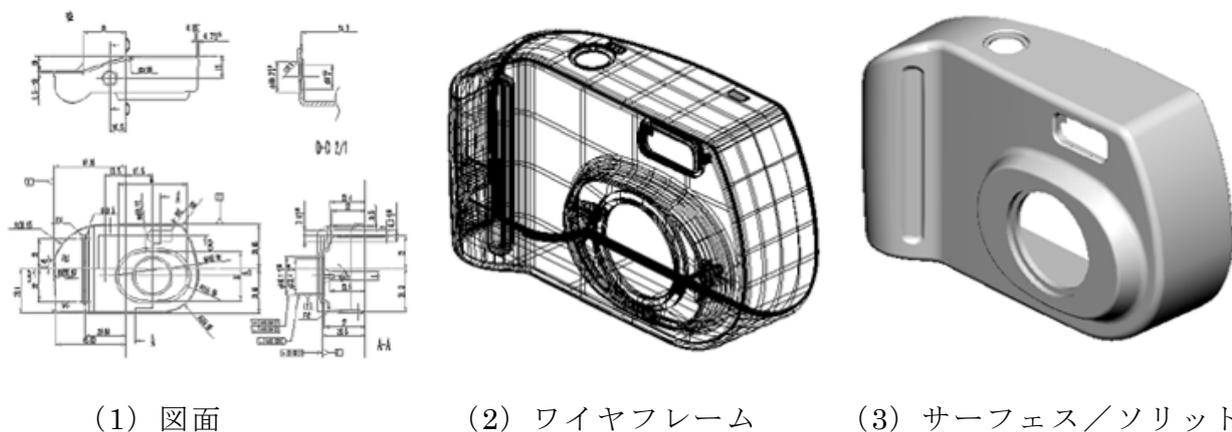


図 2.1-1 製品の形状表現方式

一方、CAM で利用される 3 次元情報表現は CAD におけるものとは基本的に異なる。CAD における情報は製品そのものの情報であるため、モノをいかに厳密に近い形で表現するかであるのに対し、CAM における情報はそのモノをいかにして実現するかという観点で表現する。例えば、複雑な曲面形状を持つ部品を表現するために、CAD ではサーフェスモデルやソリッドモデルを用いて、厳密な曲面形状を B スプラインや NURBS といった自由曲面で表現する。ところが、CAM における情報はその曲面をいかに実現するかであるため、ある材料をある機械を用いてどのような経路で削り出すかというふうに表現する。このような情報が CAD のデータを用いて直接作成されているときに CAD・CAM が統合されて

いと表現する場合があるが、そのようなデータの変換作業自体は手作業か自動かの区別はあるものの必要な場合が多い。自動化が難しければその変換作業にコストがかかるため全体の開発サイクルが滞り、そのようなコストが存在することでメリットが相殺されることから技術の導入を見合わせるという問題が生じる。このようなデータの変換に伴う問題は数多く存在する。CAD と CAM の関係以外では、設計に伴う数値解析シミュレーション（CAE）の例が代表的である。CAD による設計に関連して複雑な構造強度計算や熱流体解析が必要となった場合に、CAE を用いた検討が必要となる場合があるが、この CAE で必要とする 3次元情報表現も CAD における表現とは大きく異なる。理想的には CAD・CAE 間のデータ変換が自動的にスムーズに行えればより高度な設計支援システムが実現できるが、現状ではさまざまな問題がある。CAE についての詳細は次項（2.2 CAE）を参照されたい。

ここまで、CAD・CAM における 3次元情報表現に関して解説したが、製品開発における 3次元情報の利用は設計と生産に留まるものではない。技術の進展によって、CAD・CAM における 3次元情報利用の高度化は言うまでもなく、多様な場面での 3次元情報の利用が広がっている。

製造業において製品が作られて役割を終えるまでの流れは大きく分けて次のようなフェーズで構成される。ただし、各フェーズの順序や実際に行われるプロセスは業種や製品ごとに異なるため、ここでの並びに限定されるものではない。

- ① 製品設計：生産に十分な製品の情報を創造する
  - i 概念設計：市場調査・企画・基本仕様決定を行う
  - ii 機能設計：製品の機能を実現するために形状等を設計する
  - iii 意匠設計：外観による価値を創造するために形状等を設計する
- ② 生産：材料の加工や部品の組立および検査を経て製品を生み出す
  - i 生産設計：製品の最適な生産方法を決定する
  - ii 生産準備：生産の実施に必要な情報を作成する
  - iii 生産設備設計：生産に必要な設備を設計する
  - iv 生産設備管理：生産設備の設置・更新・保守・点検を行う
- ③ 販売・流通：製品の流通や顧客の獲得によって利益を生み出す
- ④ 保守サービス：保守サービスによる収益を獲得し顧客のニーズを把握する
- ⑤ 回収・リサイクル・廃棄

これらのフェーズを経て製品が作られ、使用され、廃棄されるまでを製品のライフサイクルと呼び、近年では製品のライフサイクル全体の情報を管理した製品開発が行われるよ

うになっている。このような情報管理を計算機によって支援することを PLM (Product Lifecycle Management) と呼ぶ。従来から CAD・CAM を中心に製品開発の情報化が行われてきたため、PLM システムの実現に CAD・CAM の果たす役割は大きい。実際、大手ベンダーの供給する 3 次元 CAD は統合 CAD と呼ばれ、製品開発の全工程を支援する PLM システムとしての性格を強めている。

## 2.1.2 製品ライフサイクルの各フェーズにおける CAD・CAM 関連技術

### (1) 製品設計

概念設計では、主に抽象的な情報を取り扱うため、3 次元 CAD の応用範囲外と見られる。しかし、CAD ソフトの中にはこのような抽象的な情報の取扱をサポートするものもある。

機能設計では、複雑な立体形状の設計・検証や部品配置の検討などに 3 次元 CAD が利用されることが多い。3 次元 CAD には、マスプロパティ計算、部品間の干渉チェック、動作アニメーションなどの機能を有するものもある。また、生成した形状を利用して構造・流体・熱などの解析を行う統合環境を提供するものや、数値解析システムへのインターフェースを持つものも多い。数値解析の結果は、多くの場合アニメーション表示される。

意匠設計での 3 次元 CAD の利用は、従来は自動車など一部の業界に限られていた。しかし、近年の 3 次元 CAD ソフトと 3D グラフィックス装置との低価格化・高速化に伴い、広い分野への普及しつつある。意匠設計においては、3 次元 CAD で生成した形状モデルの検証を行うため、(6) で述べる物理的立体モデル作成装置を利用して、実物模型を作成することも多い。

### (2) 生産設計

機械部品の多くは、鋳造した後に機械加工で仕上げるなど、複数の工程により製造される。生産設計では、部品の製品形状に基づき製造方法と手順を決定し、さらにそれぞれの製造工程における製品の中間形状を生成する。部品の製造工程の決定は熟練技術者が経験に基づいて行うのが一般的である。ただし、扱う部品の種類が限られる現場では、製造工程が一定になることもある。各製造工程における製品の中間形状モデルの生成は、加工シミュレーション等を行いながら対話的に行うことが多い。

機械加工の一般的な工程は「素材→粗加工→中仕上加工→仕上加工→研磨→完成部品」の 4 段階である。この場合、部品の完成形状から逆に研磨、仕上、中仕上の 3 段階の加工工程について、削りしろを考慮した中間形状を生成し、中仕上前の形状に基づいて素材形

状を決定することになる。

鑄造の場合は、型割り、材料を流し込む方向、流し込み口（ゲート）を決め、凝固時の収縮を考慮して型形状を設計する必要がある。また、金型による鑄造や射出成型では、型から取り出しやすくするため、抜き勾配をつける必要がある。

板金のプレス加工では、材料に割れやしわが生じないように、何段階かに分けて加工を行うと共に、特に端部のしわを防止するため、「しわ抑え面」と呼ばれる余分な形状を残した状態で成型し、最後に切り落とすということが行われる。この場合、各段階においてしわ抑え面を含む中間形状を生成する必要がある。

### (3) 生産準備

生産設計が完了すると、実際に加工・組立作業を行うための情報の生成が行われる。生産準備の代表的な例として、NC プログラムの生成、ロボットプログラミング、組立作業指示書の作成について概説する。

各加工工程について、加工前後の形状が与えられれば、NC プログラムの生成はほぼ自動的に行える。CAM ソフトでは、加工前後の形状モデルに対して工作機械の座標系（ワークの姿勢）、加工範囲、工具、加工条件等を指定することにより、工具経路が自動生成される。さらに専用のプログラムを使って個別の工作機械用の NC プログラムに変換したものをコントローラに読み込ませて加工が行われる。

ロボット導入の初期には、ロボットの作業手順は実機を人が手で動かして覚えさせていたが、近年では計算機上のシミュレーションを使ったプログラミングが主流である。ロボットプログラミング環境では、ワークの形状モデルとロボットの形状・動作モデルを用意し、作業者が目標点や通過点を指定することによりロボットの動作をプログラムすると共に、シミュレーションにより、干渉チェックや動作確認を行える。

組立作業指示書の作成では、作業指示に適した各種の投影図の作成に 3 次元 CAD データが利用される。

### (4) 生産設備設計・生産設備管理

金型やパレットは、製品形状に基づいて設計されるが、これらの操作は通常 3 次元 CAD を用いて行われる。金型の形状のうち、製品を成型する部分の形状は、生産設計で生成した部品形状や中間形状を反転することにより生成することができる。金型設計では、成型部分の形状に加え、プレス機などへの取り付けに必要な、ガイド用の形状や冷却用の形状を付加してする必要がある。これらの操作にはソリッドモデルの集合演算が効果的である。

生産設備、工場の設計にも 3 次元 CAD が活用される。近年では、工場全体の 3 次元モデルを作成して機器配置等の最適化を検討することが多い。また、生産設備の保守・管理にも 3 次元モデルが活用される。設備の修繕や改良工事では、作業計画立案の際、工場の 3 次元モデルを使って、作業機材や生産設備の設置作業シミュレーションが行われる。既存の生産設備の実態は、設計時に作成された図面やモデルと細部で一致しないことが多い。このため、改修に際して設備の実態を正確に再現する 3 次元モデルを作成することもある。

#### (5) 販売・流通・保守サービス

販売・流通の部署で利用されるレンダリングは、製品の 3 次元モデルから作成される。また、保守サービス用の図面類も、生産準備における作業指示書と同様、3 次元モデルを利用して作成される。

#### (6) 立体生成技術（ステレオリソグラフィ、3D プロッタ）

3 次元形状モデルに基づき、物理的モデルを迅速に生成する技術として、ステレオリソグラフィと 3D 彫刻機が挙げられる。

ステレオリソグラフィは、光硬化性樹脂や紙などで作った断面形状を積層して立体形状を作成する技術である。中空形状や立体的に入り組んだ複雑な形状を比較的制限なく作成できる特徴がある。形状作成時間は、複雑さや大きさにより数時間から数十時間であり、光硬化性樹脂では積層後にさらに硬化処理を行う必要がある。装置は比較的大型で高価である。

3D 彫刻機は、簡易的な NC 工作機械でワックスなどのブロックを削って立体を生成するものである。ワークの大きさにも制約があり、1 工程では 2.5 次元形状しか加工できない。加工時間は数時間程度、比較的小型で価格は 30～300 万円程度。

### 2.1.3 CAD・CAM における立体表示利用シナリオと機能要求

3 次元 CAD・CAM システムやその関連技術では、CG を用いて自由な視点で 3 次元表示が可能である点から、製品情報や生産情報の立体表示とも親和性が良い。実際、既に一部の市販 CAD システムで立体視機能の提供が行われている<sup>1)</sup>。加えて、さまざまな CAD・CAM システムの 3 次元表示を立体表示に変換するツールも存在するが、現状では立体表示が広く普及して利用されているとは言えない。よって、ここでは製品開発の各段階において、CAD・CAM システムで立体表示を利用するためのシナリオを例示し、そのシナリ

オに沿った機能要求と課題について述べる。

3次元 CAD・CAM において立体表示を利用する場合、開発の各段階で以下のような利用シナリオが考えられる。また、それぞれに関する機能要求についても合わせて示す。

- (1) 形状・空間設計支援（製品設計全体・生産設計・生産設備設計）
  - 設計者に対して形状・空間の直観的把握を容易にし、設計を支援する
  - 機能要求：視認性向上とインタラクティブ性の確保
- (2) 設計に伴う試作の代用（意匠・機能設計）
  - 設計者が内装・外観・動作を確認し、人間工学的・認知工学的な検討を行う
  - 機能要求：高臨場感とインタラクティブ性の確保
- (3) 製品の多角的検証（設計全体・販売）
  - 多人数で実物大の製品イメージを多角的に検証する
  - 機能要求：高臨場感(多人数利用・実物大表示)とインタラクティブ性の確保
- (4) 作業シミュレーション（生産全体・保守サービス）
  - 作業員(または設計者)が加工・組立作業やメンテナンス作業の内容を検討する
  - 機能要求：視認性向上とインタラクティブ性の確保
- (5) 作業トレーニング（生産全体・保守サービス）
  - 作業員に対して加工・組立作業やメンテナンス作業のトレーニングを行う
  - 機能要求：高臨場感とインタラクティブ性の確保

ここで挙げた機能要求をまとめると、「高臨場感」・「視認性向上」・「インタラクティブ性の確保」となる。ここで言う「高臨場感」とは、モノや空間が実物に近い状態で見えることを指している。一方、「視認性向上」とは、実物に近いことよりも情報の理解を助ける見せ方が必要であることを指している。つまり、3次元情報表示によって得たい情報の種類によってこれらの使い分けが必要であることを示している。「インタラクティブ性の確保」とは、詳細には「視点の変更」と「情報自体の変更」に分けられ、いずれも情報に対する理解度を向上させる点で重要な機能である。設計のように情報を創造する作業では情報自体の変更を含むインタラクティブ性、それ以外では視点のみの変更に関するインタラクティブ性の確保が望ましい。

立体表示の利用に関する課題としては、上記で挙げた機能要求の実現に必要な課題に加え、作業員や設計者に対する疲労等の影響の軽減という問題もある。いずれに関しても、その具体的な目標を定めるためには、実際の業種と製品ライフサイクルの各フェーズへの適用によってニーズから判断する必要がある。また、「視認性向上」と情報自体の変更に関する「インタラクティブ性」に関しては、ニーズからの判断に加えて、立体表示のもとでの

技術シーズを検討する余地があると考えられる。具体的な業種への適用に関しては、次節（第Ⅱ章 3 製造業における立体映像利用の可能性）を参照されたい。

## 参考文献

- 1) 平成 16 年度立体映像表示に関する調査研究報告書，(社)日本機械工業連合／(社)日本オプトメカトロニクス協会，平成 17 年 3 月

## 2.2 CAE

### 2.2.1 技術の現状

#### (1) CAE の概要

CAE (Computer Aided Engineering) とは、計算機を使用して、製品設計・開発の段階でシミュレーションや数値解析を行うことで、製品開発を支援すること、あるいはそのためのツールの総称である。CAE には、計算機によって製品の強度や性能を評価して設計上の問題点を明らかにしたり、試作品や実物モデルの製作数を減らしてコストを削減したり、という点において高い意義があり、近年では製造業での研究開発工程に欠かせないものとなっている<sup>1)</sup>。

CAE の多くの現場では、構造解析または流体解析に基づいたシミュレーションを採用している。構造解析に基づくシミュレーションの主たる例として、工業製品の強度や振動量などの静的指標算出、および動的現象（自動車の衝突事故、電気製品の落下破壊、金属部品のプレス成型や鋳造など）のシミュレーションがあげられる。流体解析に基づくシミュレーションの主たる例として、工業製品や建築物の内部の温度、気流、不純物密度、などのシミュレーションがあげられる。

CAE の具体的な作業工程は以下の通りである。

**【工程 1】** CAD で作成された設計データなどから、シミュレーション用の形状モデルを作成する。

**【工程 2】** 続いて、そのモデルを用いてシミュレーションを行う。

**【工程 3】** 最後にその結果を分析し、問題点があれば製品設計工程にフィードバックするか、あるいはシミュレーションを再試行する。

CAE の多くは、3 次元 CAD で設計された 3 次元形状データを基にして行われていることから、CAE の工程全体が 3 次元情報技術の集合であるともいえる。その中でも特に

[工程 1]と[工程 3]は、3次元情報の高度な表示・操作技術を要する工程である。

特に近年では、CPU速度の向上、メモリ装置の低価格化、並列計算などの大規模計算技術の充実、などにより計算自体に要する時間は短縮の一途をたどっている。よって近年では CAE の状況も、計算本体である[工程 2]よりも、人間の手動操作や視覚判断に頼る[工程 1][工程 3]のほうが大きな時間を占めるようになっており、それを支援するハードウェア・ソフトウェア環境の充実が望まれている。

## (2) メッシュ分割

[工程 1]の中でもキーとなる技術は、設計データを構成する曲面や立体を、三角形や四角形などの細かい要素の集合に分割する、「メッシュ分割」と呼ばれる技術である。メッシュ分割は既に市販 CAE ソフトウェアの多くによってサポートされており、その性能は向上の一途をたどっている。

CAD を用いて作成された曲面形状の例を図 2.2-1(左)に示す。またこれをメッシュ分割した結果例を図 2.2-1(中)に示す。一般的に CAD で作成された曲面形状は、数枚～数十枚の細かい曲面情報(パッチと呼ばれることが多い)をつなぎあわせて設計することが多い。市販 CAE ソフトウェアに装備されているメッシュ分割機能は、このようにして設計された曲面形状に対して、必ずしもそのまま自動でメッシュ分割できるとは限らない。例えば曲面形状が非常に細かい曲面パッチの集合で構成されているとき、また例えば隣接曲面間に厳密な接続性が保証されていないときなどには、自動メッシュ分割の工程が働かないことがある。このような場合に製品設計者は、メッシュ分割だけの目的のために、元々の形状との誤差をできるだけ小さく抑えつつ、かつ自動メッシュ分割が適用可能な形状モデルを、別個作成する必要がある。この工程には、CAD/CAM の工程と同様に、複雑な 3次元形状を表示・操作できる技術が必要になる。

一方、メッシュ分割結果の良し悪しは、シミュレーションの結果に大きく影響を与える。信頼できるシミュレーション結果を得るためには、良好なメッシュ分割結果を得る必要がある。そのため多くの市販 CAE ソフトウェアは、メッシュ分割結果を数値評価する機能を装備している。この数値評価は多くの場合において、メッシュ分割結果である三角形や四角形の各々の数値指標(例えば頂点の角度、辺の長さ、最大辺と最小辺の長さの比)を算出している。このように、三角形や四角形の形状を局所的に自動評価することは可能であるが、メッシュ分割結果の大域的な傾向を数値評価することは難しい。例えば図 2.2-1(中)のようなメッシュ分割結果を評価する際に、メッシュ分割結果を構成する個々の三角形・四角形の形状を自動評価することは可能である。しかしメッシュ分割結果を大

域的に自動評価することは難しい。例えば三角形・四角形の形状分布や、三角形・四角形の全体的な整列方向、などの大域的な傾向は、技術者の経験則を交えながらの視覚評価に頼っているのが実情である。この視覚評価の工程においても、3次元情報の表示技術、さらにはこのような3次元情報に対する拡大縮小、回転、局所抽出、などの操作技術は重要な役割を担う。

ここまで曲面を2次元的にメッシュ分割する例を説明してきたが、主に流体解析に基づくシミュレーションでは、立体形状を六面体などの細かい立体要素にメッシュ分割して用いることも多い。しかし立体要素の自動分割のための形状モデル生成、および立体要素のメッシュ分割結果の視覚評価は、曲面の場合よりもさらに難しい。ここで立体形状を六面体の集合にメッシュ分割した例を図2.2-1(右)に示す。立体形状の場合には、立体要素の奥行き方向の重なりが非常に多く発生するため、これをそのまま視覚評価することは非常に難しい。この視覚評価を実現するためには、曲面形状のメッシュ分割結果以上に、高度な3次元情報表示技術が必要になる。

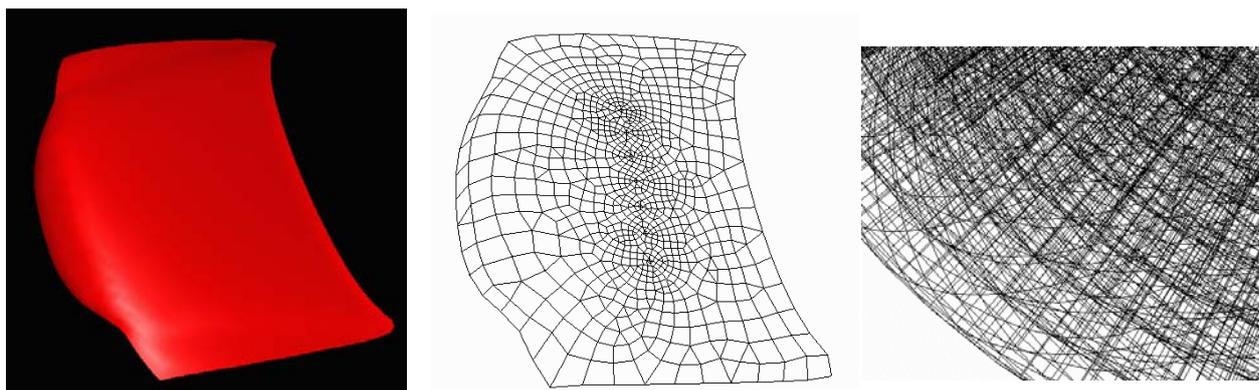


図 2.2-1 (左) メッシュ分割対象となる入力曲面形状の例。  
(中) 曲面形状のメッシュ分割例。(右) 立体領域のメッシュ分割例。

### (3) 可視化

[工程 3]の中でもキーとなる技術は、CG (コンピュータ・グラフィックス) を用いてシミュレーションの結果を表示する「可視化」と呼ばれる技術である。

多くのシミュレーションでは、メッシュを構成する頂点にその計算結果を割り当てる。計算結果となる数値には、例えば圧力・応力・温度・速度などのスカラ値と、風速などのベクタ値がある。このスカラ値やベクタ値に仮想的に色・形状などを与え、CG を用いて表示することが、CAEにおける可視化の主要なプロセスである。シミュレーション結果を正しく理解し、その結果を正しく製造工程に反映させるためには、シミュレーション結果

の視覚的理解を支援する可視化は非常に重要なプロセスである。

スカラ場として与えられたシミュレーション結果を可視化した例を、図 2.2-2(左)に示す。この例は、室内の温度分布を計算した結果から、温度が等しい点の集合として得られる曲面（等値面）を抽出して、CG で表示したものである。ベクタ場として与えられたシミュレーション結果を可視化した例を、図 2.2-2(右)に示す。この例は、室内の空気の流れを計算した結果から、ある点を出発する空気の流れの軌跡を描く曲線（流線）を抽出して、CG で表示したものである。

CAE のシミュレーション結果は、しばしば非常に複雑なスカラ場やベクタ場の分布を生む。また、CAD による形状モデル自体が複雑である場合も多い。このような状況における数値分布の大局的傾向および局所的傾向を正確に理解するには、3次元情報の拡大縮小、平行移動、回転などの操作が必要である。また3次元情報の内部に没入することでシミュレーション結果の実感を得るような技術も有用である。このように、CAE のシミュレーション結果の可視化には、複雑な3次元情報を正しく理解するために、高度な3次元情報表示技術が必要である。

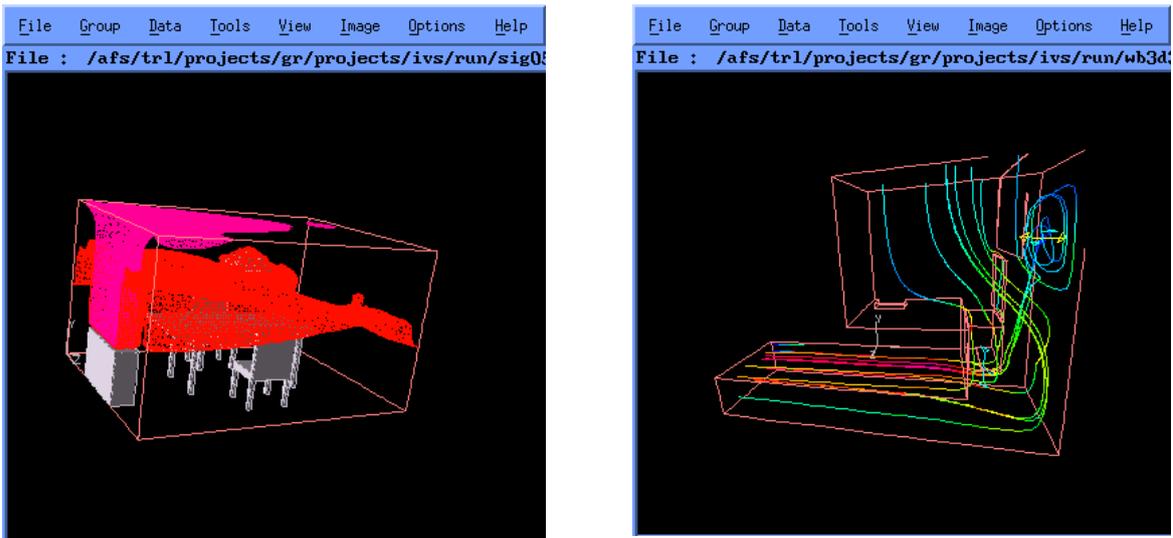


図 2.2-2 (左) スカラ場として与えられるシミュレーション結果の可視化の例。  
(右) ベクタ場として与えられるシミュレーション結果の可視化の例。

### 2.2.2 立体映像の可能性

前節で説明したとおり、メッシュ分割および可視化の工程は、3次元情報を人間が対話的に操作する工程でもある。これらの工程において、立体映像技術が貢献できる可能性は高いと考えられる。

メッシュ分割の商用ソフトウェアで立体映像表示装置をサポートしている例は、現時点ではあまり聞かれることはない。しかしメッシュ分割のための手動操作や視覚評価などの工程において、立体映像表示装置が有用であることは間違いない。今後の立体映像表示装置の技術進歩や普及度によっては、メッシュ分割の工程において立体映像表示装置が活用される余地は大きいと考えられる。

可視化の工程において立体映像表示装置の用途は、大きく2通りが考えられる。1つは、シミュレーションを行う各々の技術者が、日常業務の中で可視化技術を用いて、各々の環境でシミュレーション結果を分析する目的である。この場合には、デスクトップパソコンのモニターやノートパソコンのディスプレイなど、日常業務用途で使える規模の立体映像表示装置を用いることが望ましい。もう1つは、多数の技術者が一堂に集まって、シミュレーション結果を共有しながら議論をする目的である。この場合には、多人数による同時閲覧に堪えうる、大規模な立体映像表示装置を用いることが望まれる場合も多い。

近年の商用可視化ソフトウェアの中には、高度な3次元情報表示技術の一環として、立体映像表示用ディスプレイをサポートしている商品が増えている。最も有名な商用ソフトウェアの一つである AVS<sup>2)</sup>では、変更方式ディスプレイ、同期型マルチディスプレイ、アナグリフ方式ディスプレイ、裸眼立体視モニター、3次元型ディスプレイ、など様々な形式の立体映像表示装置をサポートしている。

#### 参考文献

- 1) <http://www.atmarkit.co.jp/aig/04biz/cae.html>
- 2) <http://www.kgt.co.jp/product/avs/>

### 3 製造業における立体映像利用の可能性

#### 3.1 自動車業界

##### 3.1.1 はじめに

自動車の意匠設計の分野では、1990 頃より NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) データを用いた 3次元形状作成を作業プロセスの中に取り入れ、それを計算(レンダリング)して得られる CG 映像(以下 3DCG と表記)を、意匠評価で活用する試みが始まった。また、立体映像に関しては、3DCG の現実感をより高めるための手法として、ほぼ同時期に始まったと記憶している。以来 3DCG は、様々な用途において試行・評価・適用が繰り返され、現在に至っている。

本分野での 3DCG 活用は、各社とも特色があるが、全般的な傾向として、以下のような特徴が挙げられる。

- (a) 意匠を方向付ける段階において、3DCG は実物モデル(粘土、樹脂等を使い意匠設計の過程で作成される模型。1/1 サイズ・1/4 サイズ等がある)の代替としても活用が進んでいる。
- (b) 重要な意匠評価は実物モデルを利用する。
- (c) 3DCG で意匠評価をする際には、立体映像に限らず、2次元画像も多く利用されている。

本項では、自動車の意匠設計での 3DCG 利用について事例を挙げ、それらの中で抱えている課題、問題点を示す。また、立体映像について今後何を改善すれば、より活用が進むかを考察する。

##### 3.1.2 自動車業界における 3次元情報活用の現状

自動車の意匠設計における 3DCG の用途としては、主にその評価および、社内外でのプロモーションが考えられる。まず、それらの用途ごとに、立体映像への要求項目とその要求レベルをまとめる(表 3.1-1)。また要求項目ごとに、立体映像装置の現在の技術レベルを分析してみる(表 3.1-2)。

表 3.1-1 立体映像への要求項目およびその要求レベル

用途 要求項目	意匠評価				プロモーション
	外装		内装		
	初期段階	最終段階	初期段階	最終段階	
奥行き再現精度	△～-	◎	○～-	◎	△
色再現性	○～△	◎～○	○～△	◎～○	○
HWサイズ（空間サイズ）	○	○	△	○	○～△
眼鏡の有無	△	△	△	△	△
視野角	△	○	○	◎	○
映像解像度	◎	◎	◎	◎	○
多人数での同時観察	△	◎～○	△	○	◎～△
観察者が視点操作可能	○～△	○～△	○	○	○～-
各観察者の体感差が小	○	◎	○	◎	△
準備・操作の簡便性	◎	△	◎	△	○～△

（要求レベル： 非常に高い◎、高い○、高くはない△、必要なし-）

表 3.1-2 立体映像への要求項目および立体映像装置のタイプ別技術レベル

要求項目	装置	WALLタイプ	CAVEタイプ	HMDタイプ
奥行き再現精度		○	○	○
色再現性		○～△	○～△	○
HWサイズ（空間サイズ）		○	◎～△	◎
眼鏡の有無		有、無（裸眼）	有	有
視野角		○	○	○
映像解像度		◎～△	○～△	△
多人数での同時観察		△	×	◎～△
観察者が視点操作可能		◎～△	◎～△	◎～△
各観察者の体感差が小		△	△	○～△
操作・準備の簡便性		◎～○	△	△

（技術レベル： 現状でもOK◎、高い○、不十分△、不可能×）

意匠評価用途としては、内外装とも初期段階での利用と最終段階での利用の2つに区分でき、それぞれ立体映像に対する要求レベルが異なる。初期段階とは、意匠の方向性を決めるために、形状修正とその評価を何度も繰り返す段階であり、最終段階とは、意匠がほぼ固まり、微小な形状修正・最終的な意匠評価を行う段階である。

表 3.1-1 および表 3.1-2 を関連付けて見てみると、内外装における初期段階の意匠評価および、プロモーション用途においては、いずれかの立体映像装置の技術レベル(性能)が、要求レベルと同等か、やや上回っていることが分かる。よって、本用途においては、立体映像の活用が可能であると言える。実際に、各社とも状況に差はあるが、実質的な活用が始まっている。

では、用途ごとに、立体映像の利用において何が要求されるのか分析してゆく。

まず、初期段階の意匠評価を考えてみる。ここでは、いかに数多くの評価を日常的に実施してゆくかが重要であり、準備・操作の簡便性への要求レベルが高い。また同様に、映像解像度への要求レベルも高い。それに対して、奥行き再現性の精度、色再現性、多人数での同時観察に対する要求レベルはそれほど高くはない。

図 3.1-1 に立体映像装置のタイプを示す。現状は、WALL タイプが上記の条件に最も合致している。CAVE タイプと HMD (Head Mount Display) タイプは、映像の解像度、操作・準備の簡便性に関してやや不利である。その背景として、WALL タイプが、複数のビデオプロジェクターの映像を1画面として扱い高解像化できること、また装置の構成が比較的シンプルで利用し易いことがある。多人数での同時観察、空間サイズといった、CAVE や HMD タイプが得意とする項目もあるが、本用途において、その要求レベルが高くはなく、その利用は、やや限定的となっている。

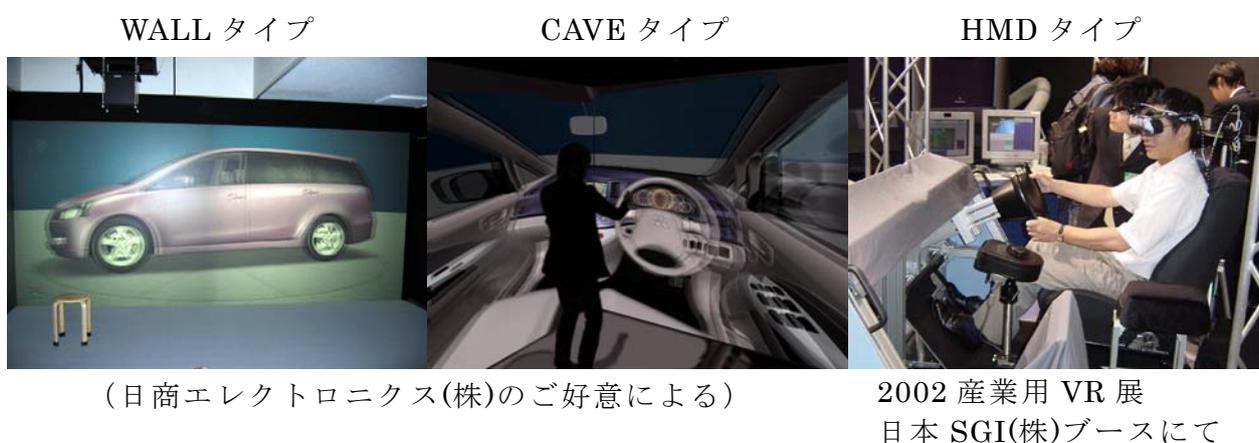


図 3.1-1 立体映像装置のタイプ

次に、プロモーション用途について分析する。ここでの映像利用の特徴として、まず、動的な映像内容が多いことが挙げられる。したがって、意匠評価用途ほどの画像解像度は通常要求されない。また、事前に作成された映像コンテンツを、決まった手順で繰り返し映写することが多いため、操作・準備の簡便性に対する要求レベルもそれほど高くはない。本用途では、CAVE タイプおよび HMD タイプも要求レベルを満たしており、表示するコンテンツによっては、WALL タイプよりも効果的である。空間サイズを重視するか、解像度を重視するか等、利用目的によって装置のタイプを選択することになる。

そして、最終段階の意匠評価での活用についても分析してみる。この段階は、初期段階とは異なり、奥行き再現精度への要求レベルが高まる。また、各観察者の体感差が小さいことへの要求等、現状の立体映像技術では対応が難しい項目が出てくる。別の見方をすれば、自動車の最終段階の意匠評価において、利用が可能な立体映像技術の確立が、一つの目標になると考えられる。

よくデザイナーの会話で「面の張りが弱い」、「線が引けて見える」、「もう少しピーク感を」などといった表現が使われる。これらは、意匠の修正内容を伝達するための表現であるが、その修正量は、10 分の数ミリ、またはそれ以下の微小な量でことも多い。本段階の意匠評価は、繊細な感覚が要求される作業であり、立体映像を利用する際には、そこから微細な形状やニュアンスを正確に感じ取れることが必要となる。

### 3.1.3 自動車業界における立体映像の適用分野と課題

ここでは、自動車の意匠設計の最終段階で立体映像を活用することを想定し、改善すべき項目を挙げ、具体的に考察してゆく。

#### (1) 奥行き（サイズ）の再現精度について

自動車の意匠設計において、「車体のサイズ感」は重要な評価項目の一つである。サイズ感というのは、実際の車体寸法もあるが、その意匠から受ける感覚的な寸法も含んでいる。車体の特徴線や断面形状の違いにより、車は大きくも小さくも見える。3DCG の表示において、よく“実寸大”と言う表現を用いるが、立体映像を用いて車の意匠の最終判断をするならば、観察者が感じ取るサイズは、実車との整合がとれたもの、すなわち実寸大でなければならない。その整合性(再現精度)が低ければ、それだけ判断上のリスクが増すことになる。

立体映像を生成する際、「視点・注視点・視野角」、「映像が投影されるスクリーンと観察

者の位置」、「映像投影サイズ」等の設定を正確に行うことで、現在の技術レベルにおいても実寸大は体感できる。しかし、例えば大型の WALL タイプの装置でも、それを精度よく体感できる観察位置は、2,3 名が辛うじて直立できる程度の狭い範囲である。また、映像精度の判断は、観察者個人の感覚によるものであり、複数の観察者が同様に見えている確証はない。したがって今後は、精度の信憑性の検証および、観察者ごとの個人差の検証を行う必要があると考えられる。

## (2) 観察者の個人差について

同じ立体映像を見て、観察者により奥行き感が変わるとすれば、最終段階の意匠評価での活用は難しくなる。

立体映像に関して、個人差の原因となると考えられる事項には以下のようなものがある。

- ① 輻輳調節の矛盾（奥行き感のある映像を観る際も、眼の焦点(ピント)は常にスクリーンの位置にあること）
- ② 両目の間隔の個人差
- ③ 視力の個人差
- ④ 映像内の全ての部分に焦点(ピント)が合うこと

①～③に関しては、既に多くの研究がなされている。④に関しては、特に車の内装を立体映像で観察した際に、不自然さとして顕著に感じられる要因となる。その改善についても、研究のさらなる進展が期待される場所である。



図 3.1-2 注視していない部分にも焦点(ピント)が合う

例えば、ドライビングポジションからスピードメーターを注視する場面を想定する。実車では、助手席側の内装部品や、Aピラー(フロントウィンドウ両脇の柱部分)の上部等は、

視界内にはあっても焦点が合わず、視覚的には明瞭に認識されない。これを立体映像で再現すると、図 3.1-2 に示すように、注視していない部分も常にピントが合って表示され、必要以上に見える状況になる。こうした状況は、観察者へ不自然さを与え、さらには個人差等を生んでしまう原因となりうる。

利用者の立場で考えると、こうした個人差を埋めるための対処法としては、以下のようなことが可能になれば有益であると思われる。

まず、④に対しては、注視点から奥行き方向および左右上下に離れた部分のピントをぼかす技術の確立が必要と考える。方法としては、例えば観察者の瞳の位置を検知して注視点を割り出し、画像処理により周辺をぼかす、といったことが考えられる。

①の輻輳調節の矛盾に対しては、立体視には眼鏡が必要なことを利用して、そのレンズ(フィルタ)の厚みをアクティブにコントロールすることで、観察者の輻輳調節をアシストする様な機能が有効ではないかと思われる。④に対する方策との相互利用で、興味深い結果が得られるであろう。

### (3) 画像の解像度について

デジタル映像には、図 3.1-3 に示すようなジャギーが付き物であり、精度が求められる意匠評価では、それが大きな障害になる。WALLタイプ、CAVEタイプ等の装置は、一般的に映像の1ドットのピッチが2mm程度ある。意匠評価での利用を考えると、その半分以下になる事が望まれる。また、ジャギー部分をぼかして、キザギザを目立たなくするアンチエイリアシングと言われる技法があり、キャラクタ線などの意匠評価において効果的であるが、反面、微細な形状が見えにくくなる弊害がある。

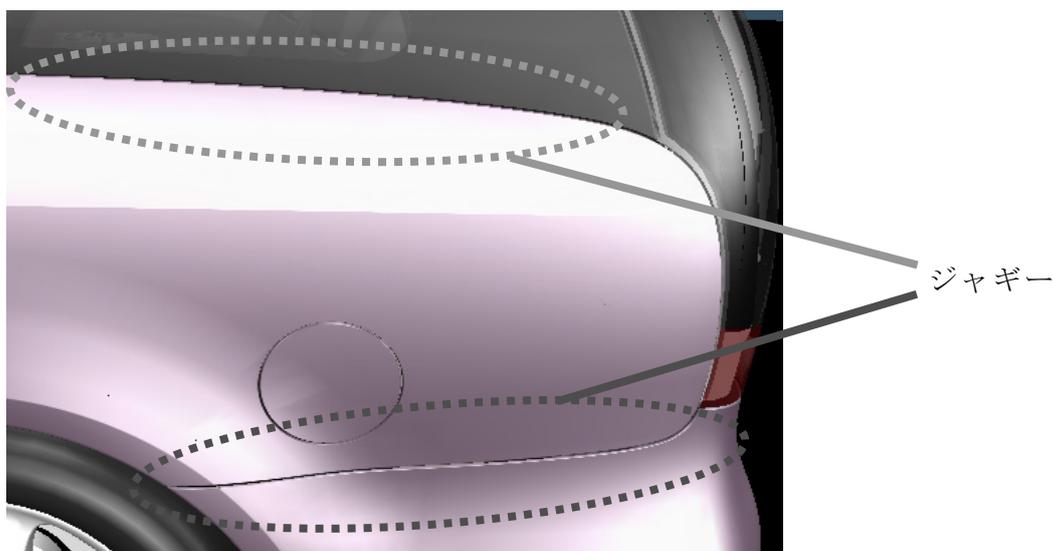


図 3.1-3 画面解像度とジャギー

本項目での課題は、表示装置の高解像度化及び高精細な立体映像の生成技術により解決できるが、適切なコストでの早急な実現を期待したい。

#### (4) 色再現性について

立体映像の観察には、その装置の仕組みに合った眼鏡が必要になる。眼鏡の素材としては、「偏光フィルタ」、「光の透過周波数をくし型に分けるフィルタ」、「液晶シャッター」等があるが、いずれも明度低下、色彩変化がある。

自動車の色開発においては近年、デジタルプロトタイプの活用が進んだことで試作車が減少し、実車による塗色の確認等が難しくなっている。よって各社とも、色開発における 3DCG 活用に着手しているが、立体映像での色検討は、上記の様に、眼鏡による色情報の劣化があるため、まだ現実的ではない。今後は、リアリティーを高める技術として利用が始まっている HDRI (High-Dynamic Range Image) 技術の立体映像への取り込みや、眼鏡の改善など、色再現性を高めてゆく必要がある。

#### (5) 準備・操作の簡便性について

立体映像は、意匠設計に関わる多くの担当者が簡便に使用できることで、より利用が進むと考えるが、現状は、ある程度の専門知識が必要となる。立体映像の生成作業が、直感的かつインタラクティブに行える様に改善されると良いと考える。

#### (6) 多人数での同時観察について

立体映像に実寸大を求めようとした場合、同時観察できる人数は、CAVE タイプでは 1 名、WALL タイプでは数名が限界である。HMD タイプは、多人数の同時観察が可能だが、装置が大掛かりになることが考えられる。いずれにしても、会議等では、多人数での同時観察が必要となるため、本項目は前述した映像精度との両立を図りながら、どう対応してゆくかが大きな課題である。

#### (7) 観察者自身が視点操作をすることについて

実車モデルを用いての意匠評価の形態は、以下の 3 つに分類できる。

- ① ターンテーブル上で実車モデルを回転させ観察する
- ② 観察者が主導的に動いて実車モデルを観察する (1 名で)
- ③ 観察者が主導的に動いて実車モデルを観察する (多人数で)

①および②の評価形態をそのまま立体映像へ置き換えることは、全タイプの装置で可能

だが、③について可能なのは、HMD タイプのみである。WALL タイプ、CAVE タイプは1つの映像を多人数で共有するため、一人の代表者が視点操作をすることになる。今後、多人数の観察者が、個々に見たい場所を、見たい角度から見られる様な評価形態が、立体映像でも可能になれば、その利用が拡大するだけでなく、評価の効率化、精度向上にもつながる。

#### 3.1.4 今後の展望

ここまで、立体映像利用の課題や問題点を述べてきたが、その中には、例えば輻輳調節の矛盾など、早急な改善が難しいであろう内容が含まれている。そういった状況の中、利用者が活用スキルを向上させ、映像に慣れる（観る目を養う）ことなども必要なことだろう。しかし、やはり最終的には、全ての人と同様に違和感なく観察・体感できる立体映像技術の確立が目標であると思われる。今後、立体映像の活用がより進むための鍵として特に挙げたいのは、以下の5つである。

- ① 映像の見え方などにおける個人差の縮小
- ② 目の疲労度の軽減
- ③ 表示精度(実寸大)の確立
- ④ 映像の高解像度化
- ⑤ 装置の低価格化

これらがクリアされることで、真の活用が始まってゆくと考える。

3DCG や立体映像を活用したバーチャル検討の推進は、社内における直接的な効果だけでなく、産廃物低減など、環境への副次的な効果もあり、永続的な活動として取り組む必要がある。意匠設計の現場としては、バーチャル検討と、実物による検討のそれぞれの効果をよく知り、両者を上手く使いこなしてゆくことが重要である。利用者の立場としても立体映像利用への知恵を出し、さらに一歩進んだ3次元情報活用へつなげていくことが求められる。

## 3.2 プラント業界

### 3.2.1 3次元情報活用の現状

本項では火力・原子力・化学プラント業界における3次元情報活用の現状について記述する。

#### (1) プラント用3次元CADシステム

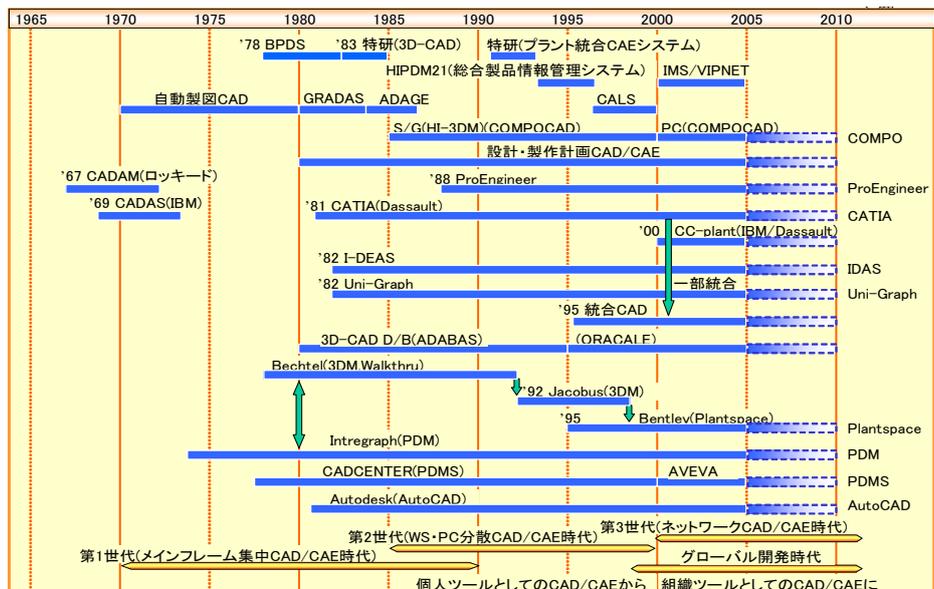
プラントエンジニアリングを取り巻く環境は国内産業の成熟化、更にはグローバル化の波が押し寄せており、国内外共に大競争時代に突入し、厳しさを増している。企業が国際競争力の向上を図るためには、より短納期、低コストで製品を提供できなければならない。そのためにはプラントエンジニアリングの飛躍的な生産性の向上を図れることが一つの条件になる。3次元CADシステムはそうした状況に対応できる有望なツールであり、その活用を効果的に行うために、さらなるシステムの高度化が期待される。

#### (1-1) プラント用CADの概史

図3.2-1に示すように、1975年代第1世代（メインフレーム集中型の時代）には、欧米で3次元CADシステムが開発され、実機プラントに採用され実用化してきた。その後、顧客のニーズ、ベンダーの努力、画像処理技術の進歩により第2世代（WS/PC分散処理の時代）において、プラント計画設計の高度化（効率、精度向上）の要求により可視化技術が進歩した。その後、第3世代（ネットワーク型システムの時代）においては各産業界のニーズに適合した3次元CADシステム採用するようになってきた。現在、プラントエンジニアリングで利用されている3次元CADには、PDM, PDMS, Plant Space, Auto CAD等がある。

3次元CADは導入している企業や業種によって考え方に大きな差がある。積極的に3次元CADを推進している企業もあるものの、一般的には主に顧客の要求によってどこまでを3次元CADで行うかが決まる。実際には、IT技術や費用の制約、組織や業界・社内内部での制約によって、3次元化が可能な範囲が制約されると言うのが実情である。また企業の属している業界の特徴によっても活用の方向に影響を及ぼす。

これらを包含して判断すれば、一部の先進的な企業にあっては積極的に3次元CADを活用し自社のものづくり、工事、検査、保守管理等プラントまとめを一貫処理し、また、情報共有化のために統合CAD/CAEシステムを開発保持しながら先進的役割をはたして



注：(1) PDS (Intergraph 社),(2) PDMS (AVEVA 社),(3) Plant Space (Bentley 社),  
(4) Auto CAD (Auto Desk),(5)その他

図 3.2-1 日・欧・米の CAD/CAE 概史

いる。一方、それ以外の企業は自社の経験則により、費用や維持する手間と、プロジェクトへの 3 次元 CAD の必要性を勘案しつつ活用を決定しているといえる。

先進欧米諸国では、3 次元 CAD をエンジニアリング推進ツール（プロジェクトモデル）と考えており、3 次元 CAD 操作に習熟したプロジェクト技術者が多く存在する。しかし国内では、3 次元 CAD を入力システム（ドラフタ）とみる傾向が強く、専用のオペレータ（多くは外注）に依存することが多い。さらには、欧米に比較してプロジェクトがモデルデータを基本ベースにしていなかったこと、3 次元 CAD システムを取り扱えるプロジェクト技術者が極めて少ないことが問題となっている。

しかし、今後はグローバル化の進展とともに、国内のプラントエンジニアリングにおいても、3 次元 CAD システムの積極的に有効活用（情報の共有化・標準化、データ交換、プロジェクトの経験）、関連ツールの整備（インテリジェント機能、コスト、操作性、機能性）及び 3 次元情報の積極的な活用が求められていくのは確実であろう。

### (1-2) プラントエンジニアリングにおける 3 次元情報

プラントエンジニアリングの変遷を、3 次元情報と関連させて示したものが図 3.2-2 である。1980 年代に多くのプラントを建造する時代に直面し、プラントエンジニアリングの効率化、精度向上、信頼性向上、コスト低減が求められた。その結果、多くの関連部門の情報を共有する手法として ① 2 次元カラーコンポジット図（複合 2 次元図面）、② モデ

ルエンジニアリング（縮尺 1/15.1/10）③ 3次元 CAD システムとが用いられていった経緯がある。

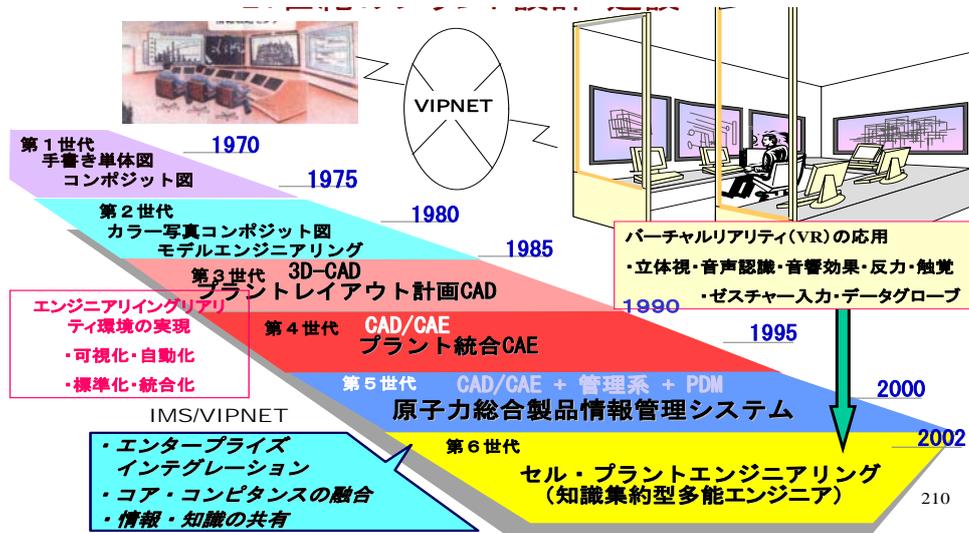


図 3.2-2 プラント設計・建設技術の変遷

### 3.2.2 立体映像の利用分野と課題<sup>1~2)</sup>

3次元情報の活用はプラント業界のニーズの高まりと、ソフトウェア(CAD, CAE, CAM, CG)、ハードウェア(WS, PC)の技術的な進歩により発展しつつある。3次元情報と立体映像を用いた更なる高度化・高度利用に関して、現状の利用をベースにして、これまで提案された内容及びこれからの展開可能性について示す。

#### (1) 既存システム

1980年代には、モデルエンジニアリングが原子力発電プラント、火力発電プラント、化学プラント等でプラント計画の主流となった。図 3.2-3 に原子力発電プラントの例を示す。プラントの総合調整レビューにおいて実体モデルが最も臨場感があることを確認した。プラントの立体映像技術は、この



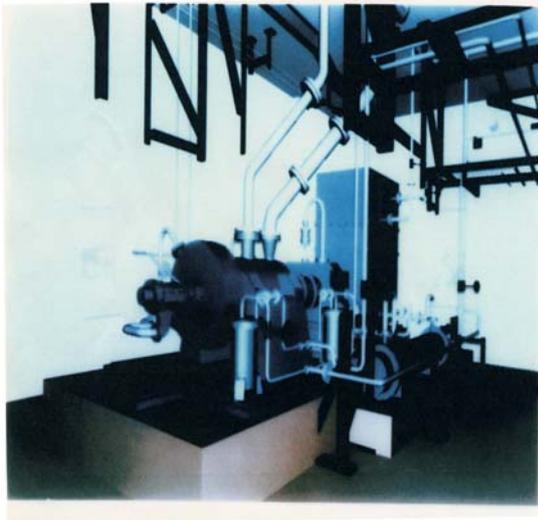
図 3.2-3 プラントモデルの例



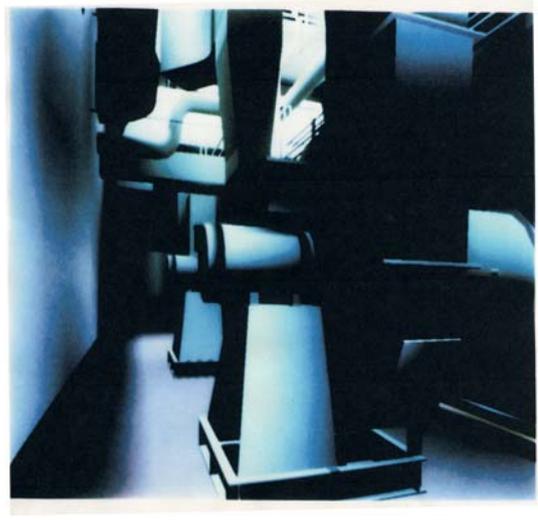
(1) 臨場感のある表現



(2) 臨場感のある表現[陰の表現]



(3) 現実的な色表現



(4) 陰影による臨場感のある表現  
[高度な光線解析]



(5) 陰影による臨場感のある表現 [高度な光線解析]

図 3.2-4 3次元情報の活用実施例

代替技術となることが期待できる。

1985年代には、3次元情報を通してエンジニアリングリアリティ環境の実現を図る試みが盛んになされた。3次元情報を利用した映像作成事例を図3.2-4に示す。また、図3.2-5、図3.2-6に示すように立体視、音声入力、音響効果、反力、触覚、ゼスチャー入力、データグローブ等のバーチャルリアリティ（VR）の応用も検討された。

## (2) プラント業界における立体映像の利用可能性

### (2-1) 既存設備の形状取得（3次元レーザスキャン）

プラントの改造時には、既存設備の形状寸法を測定する必要があることが多い。最近では、3次元レーザスキャンによりプラント設備の形状データを高速に取得する技術が大きく進歩し、利用が広がりつつある。この技術は直接的に立体映像技術に関連するものではないが、3次元情報の作成を容易にするという意味で重要である。レーザスキャン技術を利用することで、レーザ計測→3次元化→立体映像という過程を経て、設備改造の検討作業の効率化、品質向上を図ることができる。

なお、3次元レーザスキャンで獲得されるのは、大量の点群（ポイントクラウド）である。点群データの活用については、現在、いくつかのプラントCADで対応が進められている。それによって手間のかかる点群の3次元化をしなくても、3次元での検討が行えることが期待されている。したがって、計測された点群データを直接3次元情報として活用するために、点群を立体表示するというニーズも存在している。

### (2-2) 立体映像による建設現場再現

立体映像を用いることで、以下の作業がモデルベースで行えることが期待できる。これらの作業は、作業者が3次元情報を理解することが求められるため、立体映像は有力なツールとなりうる。

- ・ 施工工程シュミレーションー建設過程の確認
- ・ 顧客への施工方法の説明
- ・ 新しい施工法のレビュー

### (2-3) プラントメンテナンス技術

原子力プラントにおいては、被爆の危険性から作業時間や立ち入り場所が制限される。そのため、事前の保守作業の確認や訓練が重要である。具体的には、以下のような機器保守の作業確認・作業訓練支援システムにおいて立体映像が有効である。

- ・ 3次元情報と放射線データをベースにした、作業空間における放射線分布の可視化と被爆線量の計算
- ・ 設備内での3次元ウォークスルーの可視化
- ・ 仮想空間での保守手順の確認や保守作業性の評価
- ・ 保守作業の体感的な仮想訓練システム

#### (2-4) プラントエンジニアリング支援システム

立体映像を含むマルチメディアを利用することで、プラント設計や解析（構造解析、流体解析、振動解析）の支援を行うシステムが求められている。図 3.2-5 と図 3.2-6 はそのための支援環境を示している。

プラントは入り組んだ構造を持つため、奥行き把握が容易な立体映像が有効である。立体映像を各種シミュレーションや入力デバイスと組み合わせることによって、評価の精度向上、安全性の向上を図ることが期待できる。

#### (2-5) 高度協調作業環境の実現

プラント業務は多くの関係者が参加することから、図 3.2-7 に示すような協調作業を効率よく行える環境が必要である。仮想現実メディアを用いて仮想現実空間を複数の利用者が共有することで利用者は同一の空間を共有しながら協調作業ができる。

また、実プラントにおいては、官庁—本社設計—制作現場—建設現場間での協調が必要である。大型プロジェクターを用いて立体画像を表示することができれば、高臨場感表示ができ、効率的な協調作業環境の実現が期待される。こうした目的にも、立体映像は有望なツールである。

#### (2-6) 3次元設計室及びコントロールセンタ

プラント業務では、図 3.2-8 に示すような3次元情報による総合調整を行う3次元設計室や、図 3.2-9 に示すような遠隔地建設現場の工事進捗・物流管理を本社から制御するコントロールセンタの実現が求められている。こうした環境においても、臨場感ある立体映像が有効である。こうした施設は、立体映像の有望な市場になると考えている。

人工現実感

(バーチャルリアリティ：VR)

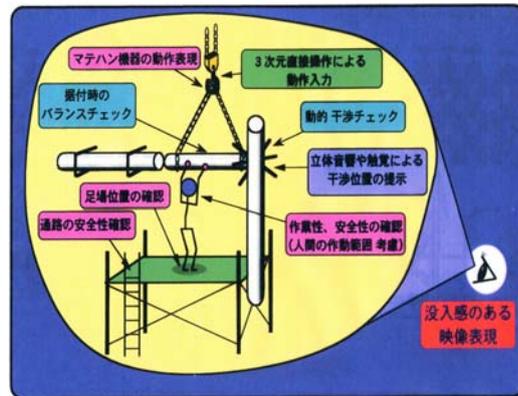
[立体視+音声入力]



(1) 3次元CAD実施例

3次元直接操作、視覚/聴覚/触覚の協調による

没入感のある建設模擬空間



(2) VR実施例：仮設計画シミュレーション

**VR**  
 (バーチャルリアリティ：人工現実感)  
 要素技術

**立体**



- ・立体視による臨場感

**音声入出**



- ・音声による操作指示

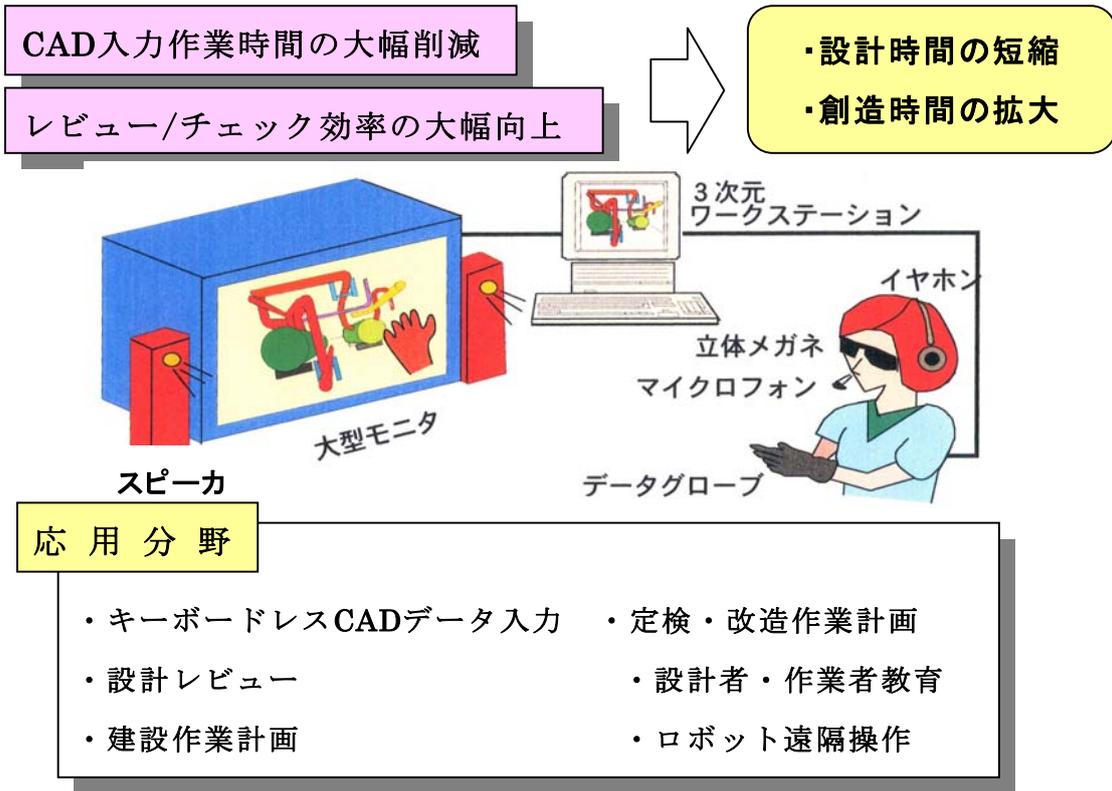
**データグローブ**



- ・CADデータ直接操作 (キーボードレス)

(3) マルチメディア：次世代設計支援ツール

図3.2-5 エンジニアリングリアリティ環境の実現



(4) 次世代設計支援ツール開発：VR応用技術



(5) VR実施例：建屋内歩行シミュレーション

図3.2-6 エンジニアリングリアリティ環境の実現



### 調整業務の効率化

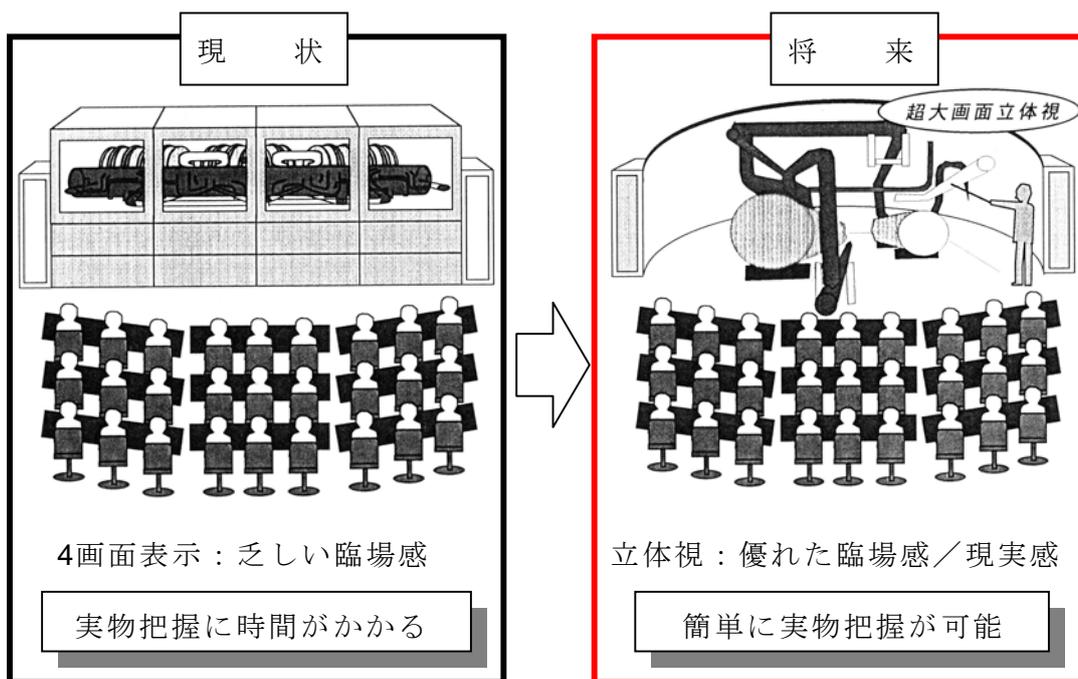


図3.2-7 理想的な3次元設計室

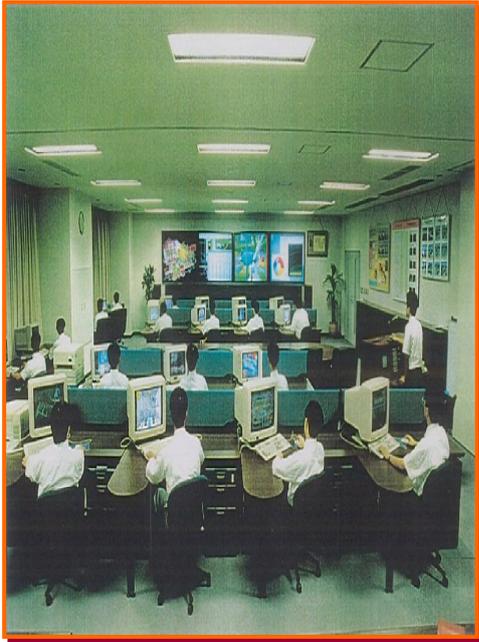


図3.2-8 3次元設計室



図3.2-9 3次元設計室及び  
コントロールセンタ方式

#### 参考文献

- 1) 好永俊昭他、「モデルエンジニアリングと原子力」日本原子力学会誌 Vol.27、No.3
- 2) 好永俊昭他、「3次元プラントレイアウト計画 CAD システム」日立評論 Vol.68、No.4

### 3.3 エレクトロニクス業界

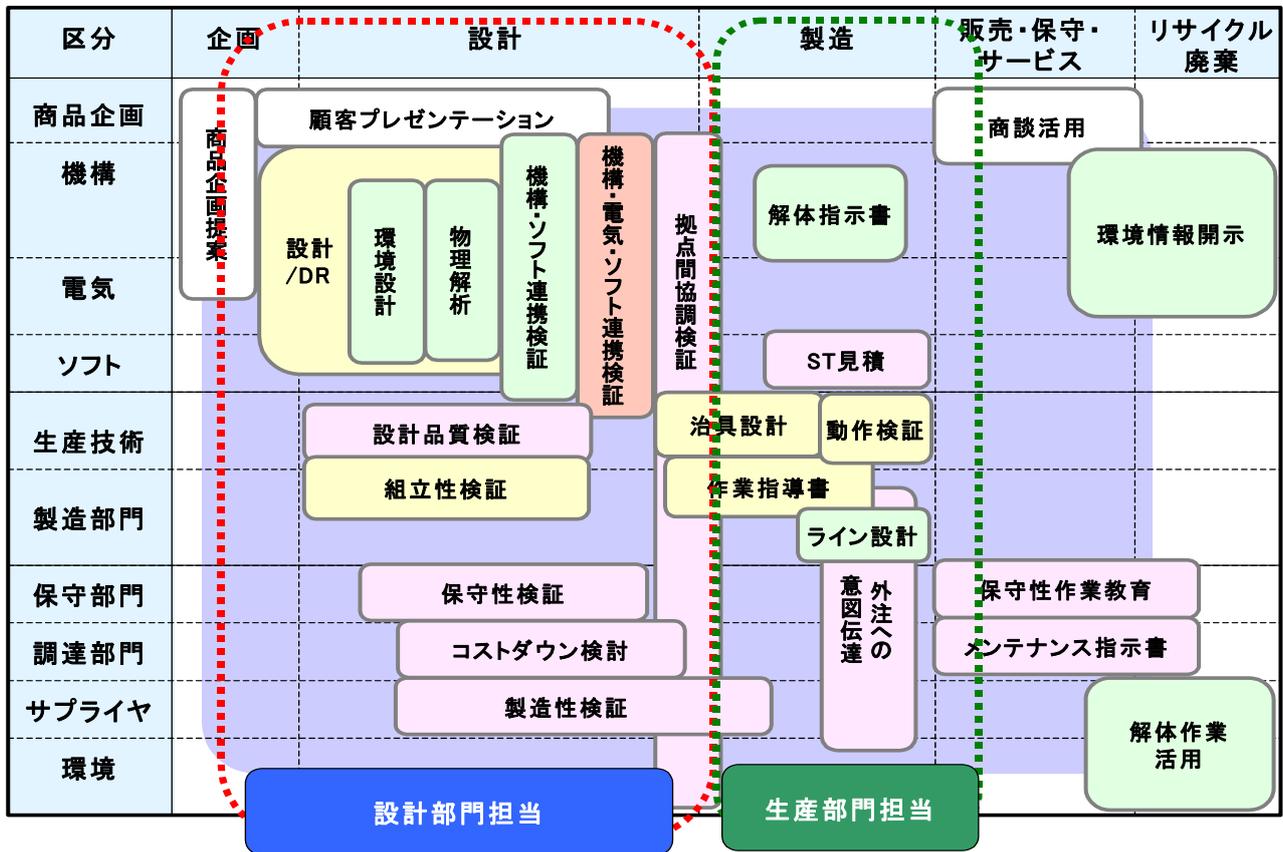
#### 3.3.1 3次元情報活用の現状

エレクトロニクス業界は通信機器、AV 機器、情報機器、光学機器、白物家電等の商品・製品分野、エレクトロニクスデバイス分野、機構分野と幅広い。企業内においては分野に拘わらず、ほぼ同じように企画部門、設計部門、製造部門、販売・保守・サービス部門、リサイクル廃棄部門と一連の流れを統合管理している。またその範囲は全世界ユーザーで、グローバルマネージングすることが求められる。

統合管理の実現手段として、“デジタルエンジニアリング”化があり、各部門で 3 次元情報データ技術の導入が図られている<sup>1)</sup>。その結果、ものづくりのスピードアップ、コスト競争力、高品質、高付加価値化が実現可能になった。又、よりユーザーに理解を深める

ため（臨場感）、立体表示技術の導入も検討されている。まず、デジタルエンジニアリングの全体像を表 3.3-1 に示す。縦軸は部門、横軸は工程、中の四角の囲みが仕事内容を示す。

表 3.3-1 デジタルエンジニアリングの区分



その中で 3 次元情報の活用範囲を図 3.3-1 に示す。3 次元設計の主な領域は機構設計、デザイン設計、金型設計にあるが、それらをベースにサービスマニュアル作成、工程設計、作業指図書、3 次元設計教育、取説作成、電子カタログ作成、商談、成型トライ品確認、金型打合せ、事前確認等に広く使われる。ここで、立体表示技術が最初に導入されるのは、電子カタログ作成、商談である。

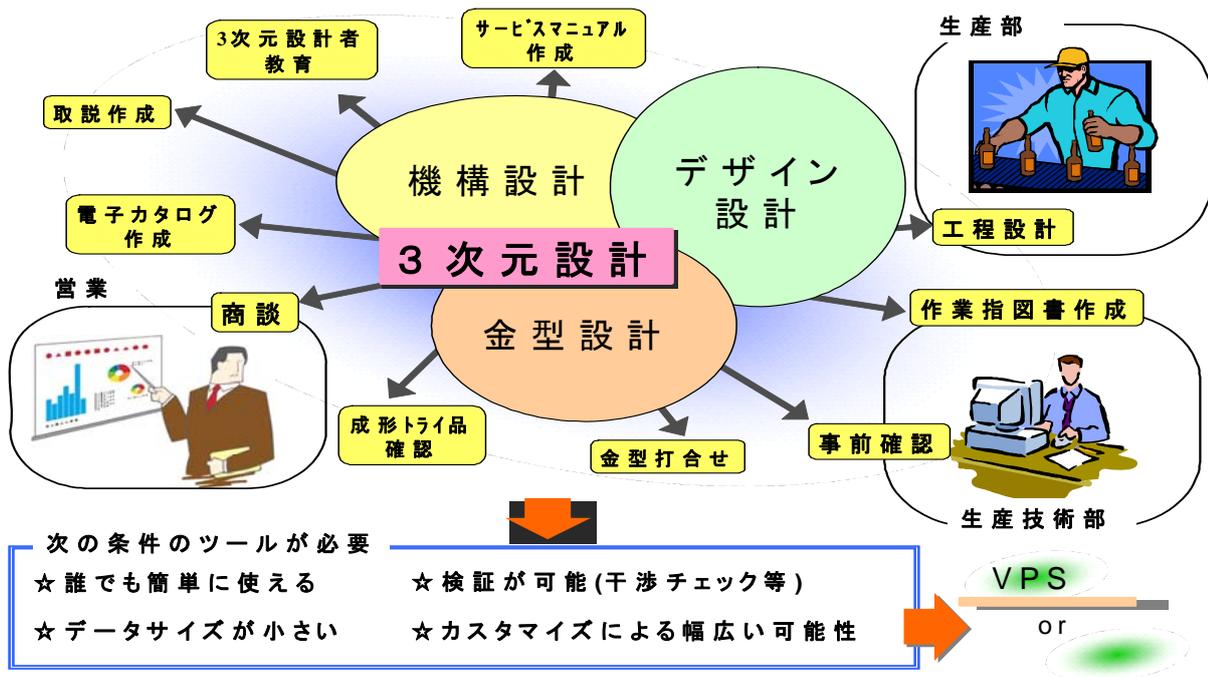


図 3.3-1 3次元設計情報の効率的活用範囲（設計以外）

(1) 3次元設計技術の取組みとして、組み立て（32インチLCDTV）、自動設計（電子レンジ）、金型設計（LCDTV）の事例を図3.3-2～4に示す。

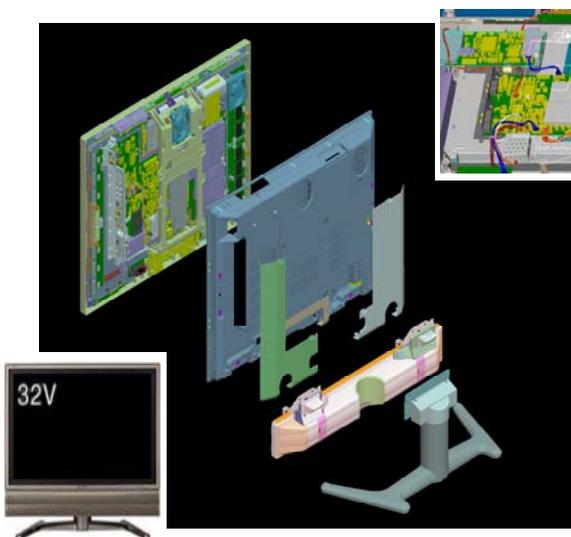


図 3.3-2 32インチLCD組み立て

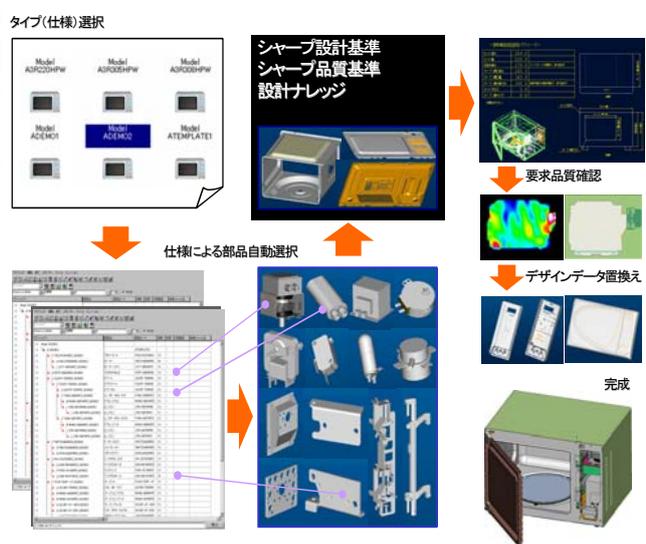


図 3.3-3 専用設計システムの事例（自動設計）

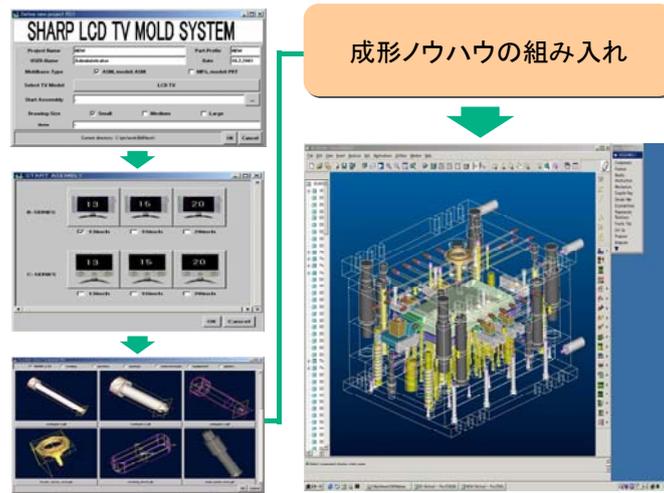


図 3.3-4 専用設計システムの事例（金型設計）

(2) 受け入れ検査の携帯電話の事例（成形品）では、構想設計、デザイン素形の 3D 元データの抽出、詳細設計、光造形品作成による設計確認、仮金型製作では設計の確認・各種試験実施・試作組立実施、最後に金型・部品完成までの流れを図 3.3-5 に示す。

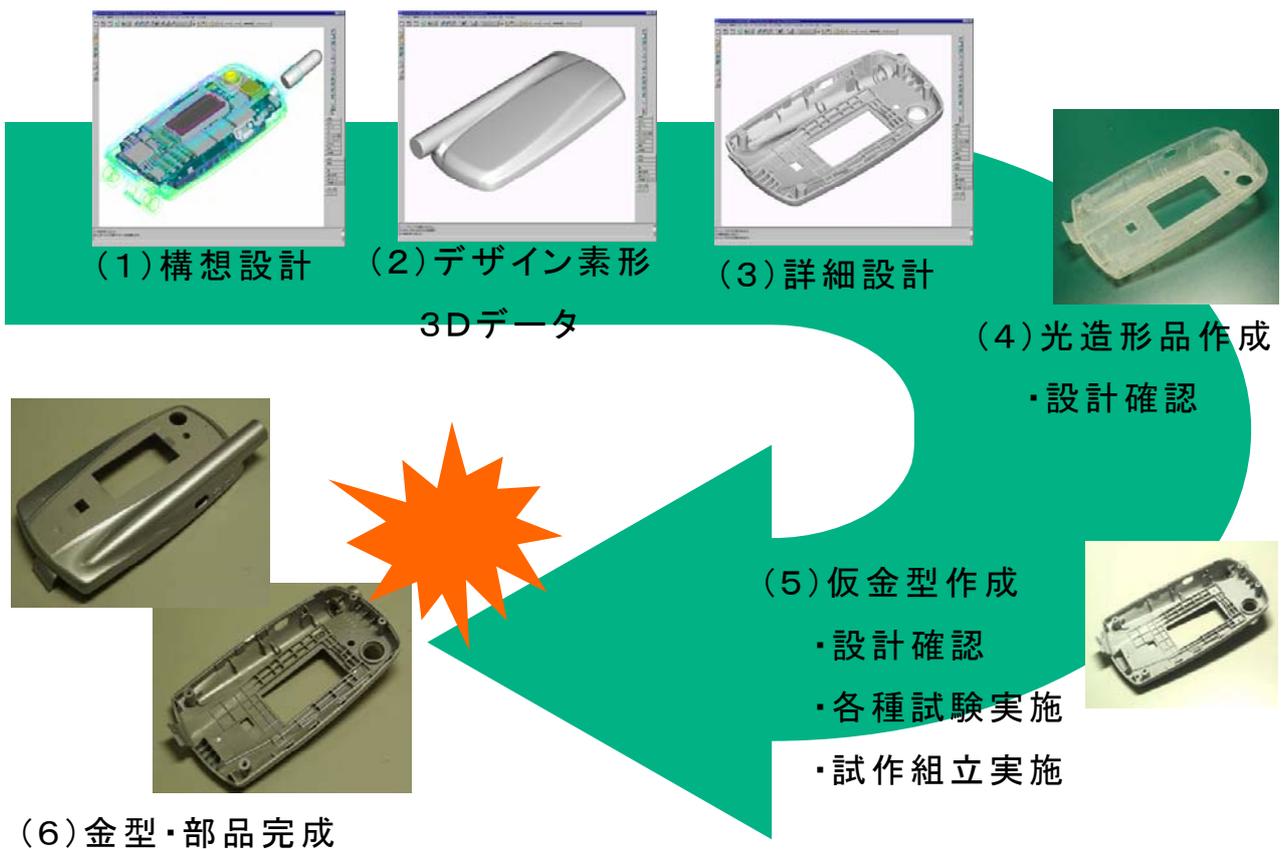


図 3.3-5 成形品受け入れ検査の事例

(3) CAD 設計において、知識ナレッジ化・設計ナビゲーションによる効率向上が期待できる。国内と海外の環境に適合したナビシステムによる開発の様子を図 3.3-6 に示す。設計の変化に対応したメンテナンス体制の確立が重要になり、海外設計者と国内管理者の間で設計環境が同じであり、進捗状況の確認と設計課題を把握し、何処で設計しても同じになる仕組みを作り上げる必要がある。

図 3.3-7 ではグローバルで設計情報、品質・環境情報、部品コスト情報が共有されていることを示している。

**海外設計者**

**国内管理者**  
(進捗状況の確認と設計課題の把握)

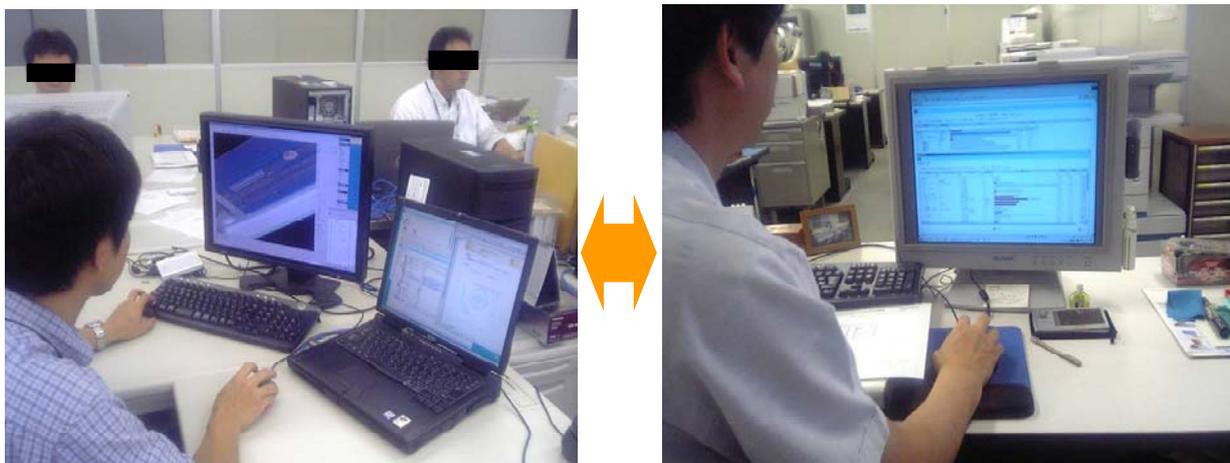


図 3.3-6 グローバルな開発環境

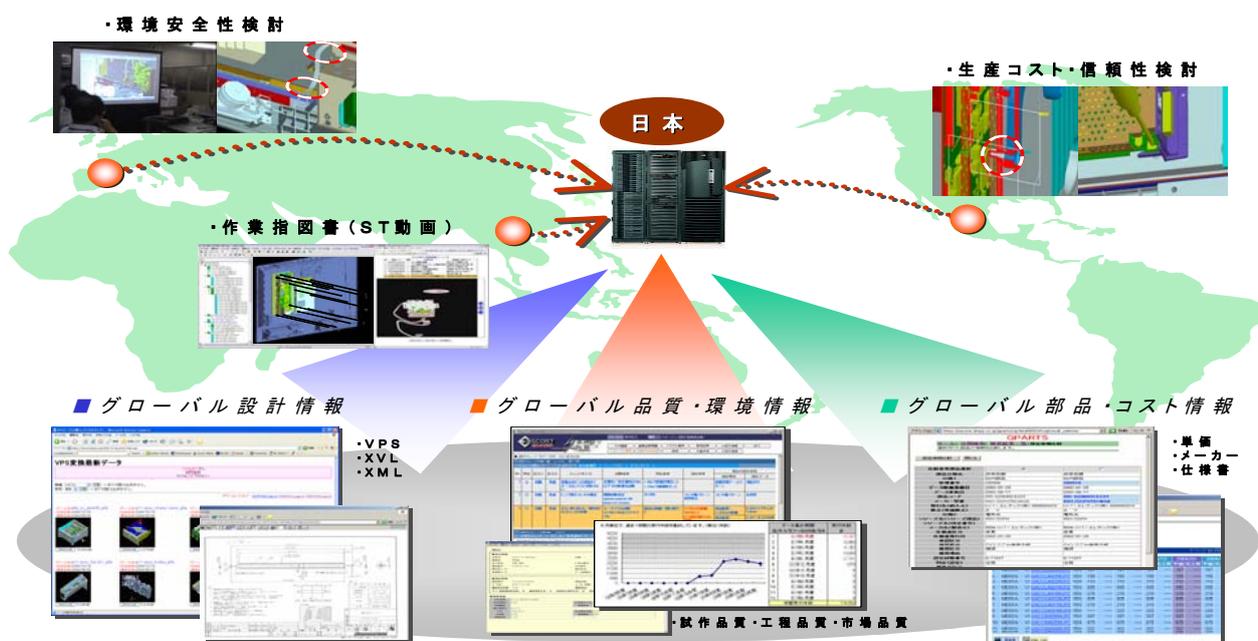


図 3.3-7 グローバルな情報共有環境

(4) 各種解析ツールは国内で集中管理し、国内でソリューション／性能向上を提案し、海外から機能実現課題／事前性能評価のフィードバックを行えるようにし、効率向上を図っている(図 3.3-8)。また設計者の人材育成と設計環境の標準化、共通化により、設計完成度を向上させて市場不良ゼロを実現すると共に、設計手戻りを無くし、コスト力強化と設計期間短縮を実現している(図 3.3-9)。

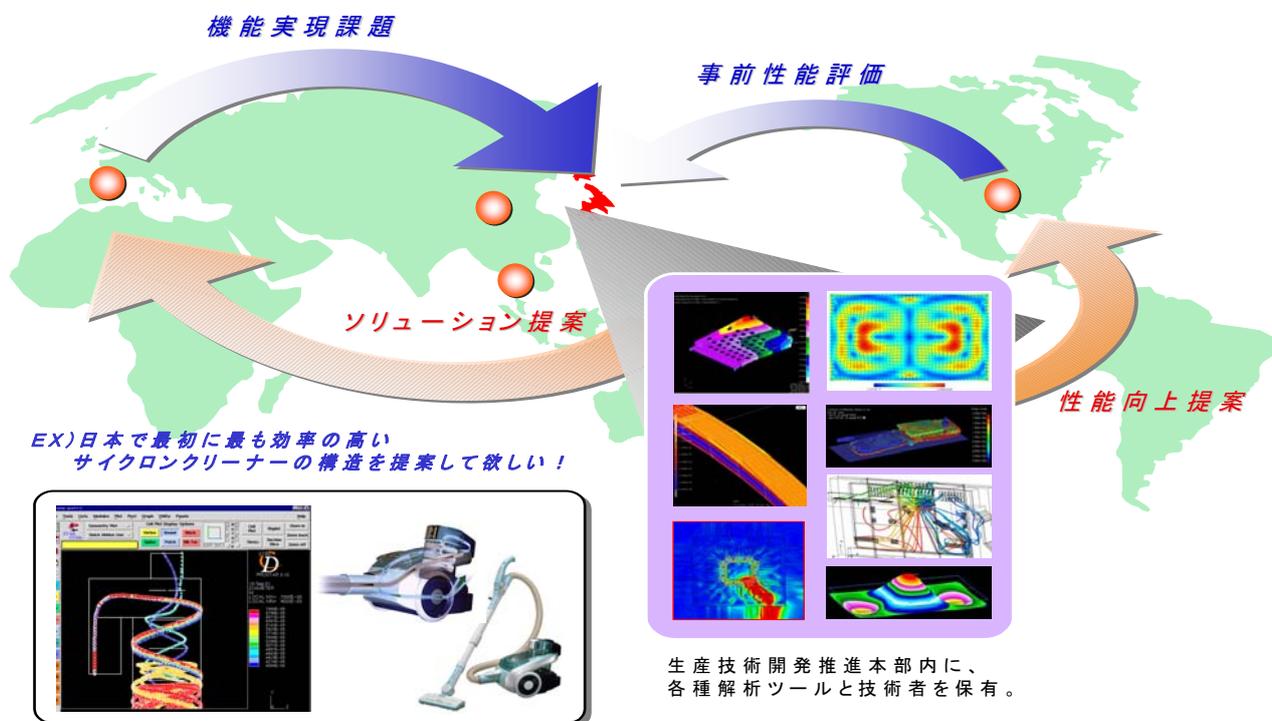


図 3.3-8 シミュレーション技術

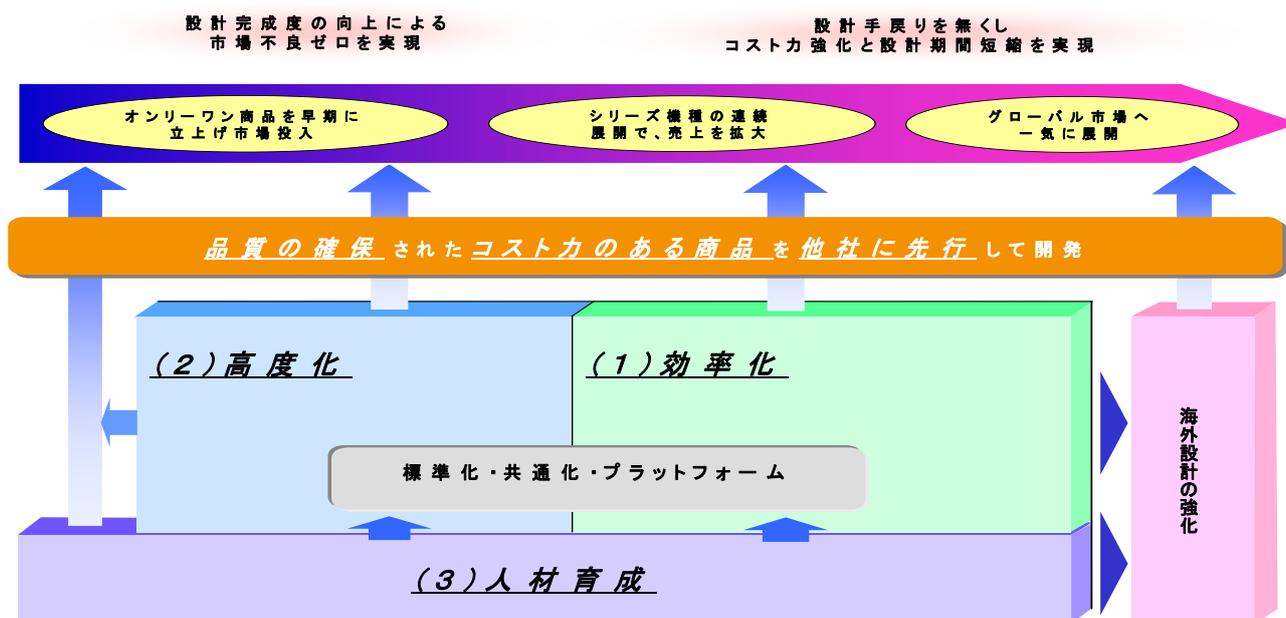


図 3.3-9 人材育成と設計環境の標準化・共通化の効果

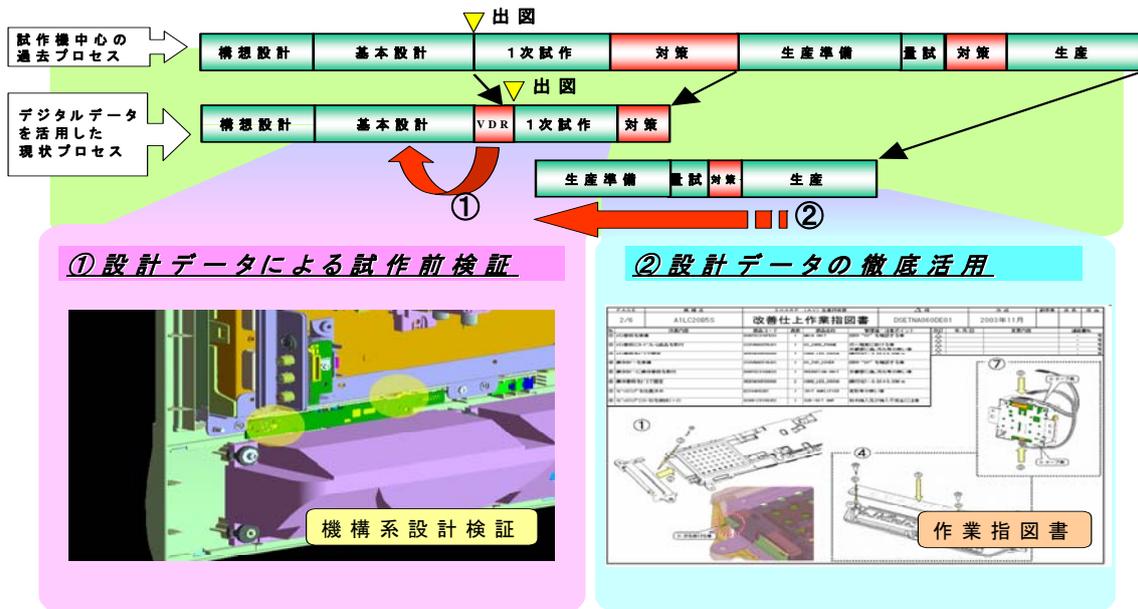


図 3.3-10 デジタルエンジニアリング導入による効率化

デジタルエンジニアリングの導入によって、試作機中心のプロセスからデジタルデータを活用したプロセスに変更され、期間短縮が図れるようになった。設計データによる試作前検証、設計データの徹底活用の例を上図 3.3-10 に示している。

### 3.3.2 立体映像の利用分野と課題

このようにエレクトロニクス業界では、デジタルエンジニアリングが浸透し始めており、3次元情報が多く存在する。しかしながら現状では、平面画像による観察が主体であって、立体映像はほとんど利用されていない。今後は、電子カタログ作成、商談といった場面から立体映像が利用されるようになると考えられ、製造現場へも徐々に拡大するものと予想される。

エレクトロニクス業界は一方で、3D技術（入力技術、処理技術、出力技術）の研究開発を促進し、具現することが期待されている。特に眼に優しい立体ディスプレイの開発が重要であり、具体的には立体表示技術に適した高分解能（8K以上）、大画面表示デバイス（100インチ以上）の期待が大きい。

#### 参考文献

- 1) 製造業を極める為の「設計 Innovation」；シャープ（株）生産技術開発推進本部  
設計システム開発センター 設計プロセス開発室 柳原吉広

## 4 立体映像の先進応用事例

### 4.1 はじめに

近年立体映像関連のハードウェア及びソフトウェアが進化し始めている、大きな進化を遂げたのがパーソナルコンピュータではないかと考える。従来コンピュータグラフィックスは巨大なワークステーションなどでしか表示の出来ないソリューションであったが、現在は、一般で販売されているパーソナルコンピュータでも従来のワークステーションを遥かに超えた表示能力を持っている。この進化のスピードは年々加速度的に増え、今後数年で予測のつかない進化をとげるであろう。

続いて、パーソナルコンピュータに搭載されている、グラフィックボードの進化も目覚ましい。この背景には一つの転機があり、当時コンピュータグラフィックスでは大手の開発者達が独立しパーソナルコンピュータ用に開発を始めた。その結果、当時何億円もしていた機材で利用していたグラフィックスボードが市販のパーソナルコンピュータで利用できるようになり、市場が急激に広がり始め、価格・性能・パフォーマンスが向上し、最近ではグラフィックスカード単体で2系統の映像出力を持ち立体表示に対応したモデルが販売されている(図4-1)。



図 4-1 NVIDIA 社製 GPU NVIDIA Quadro FX 4500

同時に偏光立体表示方式などで利用されるプロジェクタ（投影型モニタ）にも、市場の拡大や高輝度・高解像度化が進み、従来何億円もしていたシステムが現在では100分の1の価格で且つ明るい室内でも立体表示の視聴が可能になってきている。

この様なハードウェアの進化を受けソフトウェアも各社立体表示への対応が進み始め

様々な方式に対応し立体表示を可能にしている。

- (a) 3次元 CAD : CATIA V5・Alias StudioTools・PTV など。この他に立体表示機能の無い CAD でも立体表示を可能にするソフトウェアも販売されている。
- (b) ゲームソフト : FINAL FANTASY・スペースハリアー II など、立体表示方式が異なるが、立体視へのニーズの拡大を模索している。
- (c) 実写映像 : 2D 映像をリアルタイムに 3D 映像に変換する STB (セットトップボックス) や民生機用のハイビジョンカメラを利用した立体撮影レンズなど。
- (d) インターネット : Virtools・XVL と言った WEB に対応した立体表示用プラグインなどが存在する。

本項では以後、製造業における立体映像の先進的な応用事例を広範囲に紹介する。

## 4.2 CAD データを原寸大で立体視する事例

製造業において 3次元 CAD システムは、無くてはならない存在になってきている。しかしながら未だにモニターは 2次元で表示され設計者がオブジェクトを回しながら形状を把握し、自由に拡大縮小表示を行い商品の形状を設計している。

このモニターの中では、正確な寸法精度でデータは出来上がっているにも関わらず、オブジェクトの拡大縮小表示を行う為に寸法感がなく、また、表示しているモニターは、19インチや 22インチと言ったフラットディスプレイで設計が行われている。この影響で、設計している商品によってはボリューム感が感じ難く、より 3次元化された商品は、実際に試作をして初めて商品の大きさに気が付くケースも少なくない。こういったトラブルを未然に防ぐ為の試みとして、あるメーカーでは 100インチの BOX 型の立体視システム (図 4-2) を導入した。このメーカーでは、商品単位でスタジオが設けられグループで商品デザイン開発を行い意匠形状などの案を毎日繰り返し行っている。

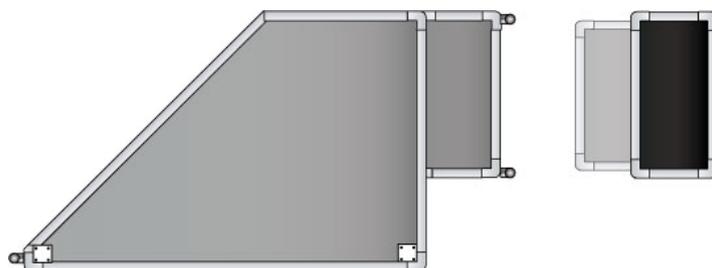
このメーカーの要望は以下の通りであった。

- (a) スタジオ間を自由に動かせるシステムでなければならない。
- (b) 商品のサイズが大きい為、横 2m 縦 1.5m のスクリーンで床から表示できること。
- (c) 室内を移動する為、奥行きをできる限り狭くし、ドアを通り抜けられること。
- (d) 細かい設計ラインを検証する為 UXGA がリアルに表示できるプロジェクタを採用。

この条件を満たした立体視システムを導入し、デザインにおける先行開発によってある程度の試作を減らし、開発期間の短縮ができるようになり始めている。若干障害があったのは、従来のデザイン開発の方法を捨てられないスタッフが存在する、データ量が大きすぎ

て思うように操作ができないといった事があった。ソフトウェアとハードウェアの限界と言う問題もあり、ソフトウェアの次期バージョンにて改善された。

ここで改善されたデザイン開発フローは、各メーカーによって注目するポイントが異なり、立体視の利用に関しては、自社のワークフローに合った利用方法を見出し、業務改善を図っている。特に大きな物を開発されている開発者にとっては、デジタルモックアップの採用により、何度でもやり直しが行え、ある程度の絞込みができる為、実績が積まれてくればくるほど、データが溜まり予測できるボリューム感が増してくる。また、開発期間の短縮化とコストダウンを実現している。



#### ■ TOP VIEW

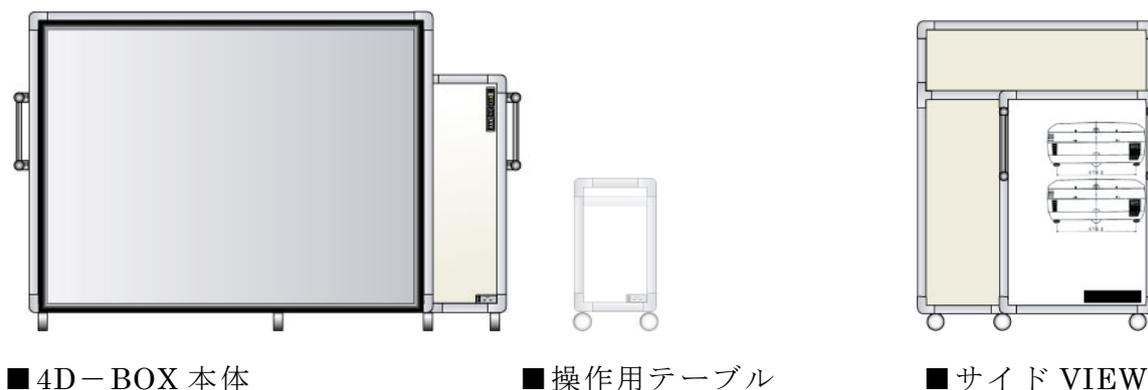


図 4-2 アペックス社製 4D-BOX 100 インチ立体視システム

### 4.3 製品開発のモデル形状のリアルタイムレンダリングを採用した事例

最近増えつつあるのが、リアルタイムレンダリング技術を利用した立体視システムがある。従来の CAD・CAM ソフトウェアでは、光源を利用した光と影の再現が難しく、コンピュータグラフィックスですら、一枚の画像をレンダリングするのに何時間も掛かる作業を必要とする。しかしながらパーソナルコンピュータとグラフィックボードの進化により、システムによっては、リアルタイムに表示できるようになった (図 4-3)。



左画像：デジカメ画像



右画像：3DCG 合成（影は調整可能）

図 4-3 リアルタイム 3DCG 合成

ここでは、製造業での実用例を紹介する。あるメーカーでは、ワールドワイドに商品の販売を行っている為、商品企画段階でデザインなどの確認を行っている。しかしながら、全世界にモックアップを持ち回りながらプレゼンテーションを行うには時間がかかる。そこで、開発中の商品をデジタルモックアップ化し、ノートパソコンを利用して多ポイント同時の商品企画会議を行った。

従来の CG イメージを貼り付けたパワーポイントの利用と異なり、CAD の様に商品を自由な角度から回して見ることができる為、モックアップを見ているのと同じ様な効果がある事から、リアルタイムレンダリングシステムを導入した。また、デジタルデータを利用する為、カラーバリエーションや機能説明・モックアップで表現が難しかったグラフィカルユーザーインターフェース（GUI）などの提案にも利用が進んでいる（図 4-4）。



図 4-4 カラーバリエーションなどの利用

ここでのメーカーからの要望は、以下であった。

- (a) 社内のデザイナーがイメージした商品案に対して、すばやく対応ができる事
- (b) モックアップのコストを削減する
- (c) 海外での商品企画会議での利用
- (d) 現在の設計部の CAD とリンクを図る

この条件を満たす為に、初期段階のデザインモックアップをラフモックへ変更し、その代替としてデジタルモックアップを採用した。プレゼンテーションにはラフモックアップとプロジェクタで投影されたデジタルモックアップを利用して商品の解説を行っている。

また、小さい商品は手に持って手触りで検証しなければならない為、モックアップを無くす事ができなく現在のバーチャルリアリティ (VR) の技術では触感センサーや反力を利用したシステムなどがあるが、現時点では、代替として利用は難しく低コストでできるラフモックアップの製作で対応している。さらに、デザイナーの出力する案もダイレクトにデジタル化が行えるように、利用するソフトウェアを 2 次元のツールから 3 次元のツールへ改善を図っている(図 4-5)。こうした会社単位での業務改善の結果、新たな製造工程を生み、生産の効率化を図り、一つのプロダクトに掛かる開発期間を極端に短縮化し、スピードとコストダウンを両立した商品開発を行い始めている。



図 4-5 デジタルモックアップ

#### 4.4 バーチャルリアリティ (VR) ショールームの事例

最後に一番目覚しく伸びている立体映像の利用法として、VR ショールームを紹介する。このメーカーでは、社内で行っている CAD と VR 用のソフトウェアを連動し、半自動的にコンテンツを制作できるようにソフトウェアの改良を行った。この手法で、数年前から VR 提案を行い、テスト的に導入した立体視システムのあるショールームでは、ここ一年

で75%の成約率にまで伸び、顧客からの評判がとて良く、昨年から全国的に整備を計画している。

このメーカーの要望は以下であった。

- (a) ショールームで利用する為、小型でなければならない
- (b) 顧客からのヒアリング後、1週間で顧客の求める物件の提案を作成する
- (c) 顧客が持ち帰り、自宅でも確認できること
- (d) 年に数回のショールームの様様替えを行う為、簡単に移動できること

この条件を満たした安い立体視システムを導入し、全国ネットでショールームに設置する計画になっている。また、VRシステムの導入で、日本中にある展示場の物件を、どこかのショールームでも体験する事ができるようになり、今まで、顧客は訪れたショールームの物件でメーカーのイメージを固めていたのが、各地の物件や過去の成約された物件などを見ることで、様々な情報とアイデアを蓄えられ、他のメーカーとの差別化が図られた。このメーカーも導入後に業務改善を行い、従来は顧客の自宅へ訪問しプレゼンテーションを行っていたのが、VRで提案するという事で、ショールームへ顧客を集め、展示されているキッチンや建材を見ながらVRの提案を行う事ができ、従来の2次元図面で打ち合わせを行っていた頃からは、遥かに短期間で仕様の決定ができ、顧客へもきめの細かい提案ができるようになった。



図 4-6 VR ソフト PYTHA による提案

このメーカーで採用された VR ソフト『PYTHA』(図 4-6)は、設計された 3 次元データにマテリアルを追加し光と影を表現することができるラジオシティと言うレンダリング技術をリアルタイムに表現する事ができる。また、提案がしやすい様にアニメーション機能や提案のチェンジ・ライティングシミュレーション・音響シミュレーションなどが出来る機能が搭載されている(図 4-7)。



図 4-7 施工案の提案例

このソフトウェアは、無料のビューワーも搭載され、CD-R などで顧客へソフトウェアを提供する事で、自宅でも見ることができる。

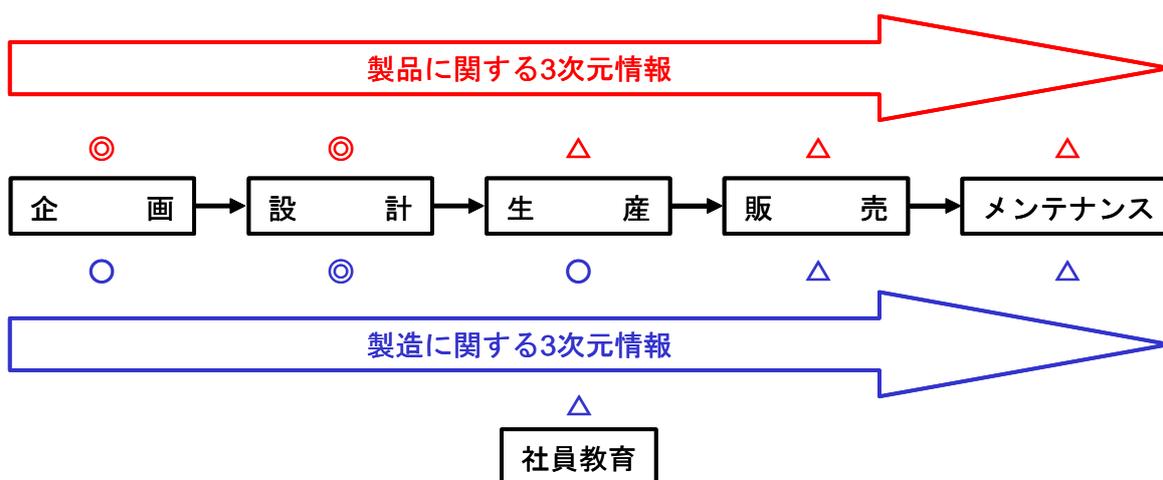
最後に、どのメーカーも立体視に関して興味はあるが、実際に実務の中へ取り込むには、製造工程の見直しや販売手法の改善などを行わない限り、単なるシステムの導入だけでは、立体視のシステムを最大限に活かすことは難しいと思われる。しかしながら、立体視の導入にて生まれる新しいソリューションは、計り知れないコストパフォーマンスと業務改善が行われ、メーカーにとっても新しい施策になると考える。

## 5 製造業における立体映像利用の課題と展望

### 5.1 製造業における3次元情報の流れと立体映像利用の現状

製造業における3次元情報の内容と流れを、製造プロセスから出荷後のメンテナンスまでのサイクルで考え、図5.1-1に示す。ここでは3次元情報を、製品の形状、色、可動部分の動作等、製品自体に関するものと、生産ラインの設計、CAEによる動作シミュレーション、組立作業指示、建物や屋外背景との関係、使い勝手といった製品以外の3次元情報に分ける。

現状で、立体映像を用いた3次元情報の利用が最も進んでいるのは企画から設計に至る段階である。特に意匠設計や3次元CADを用いた設計では、製品自体の立体感を把握するために立体映像を用いる効果大きい。次に立体映像を用いた3次元情報の利用が進んでいるのは生産段階である。生産段階では、加工や組立の作業性の向上に立体映像が利用され、主に製造に関する3次元情報を立体映像化している。また立体映像を用いた作業者の教育、訓練も試みられている。製品の検査、出荷といった販売段階では、立体映像を用いた3次元情報の利用例はほとんど見られない。顧客への宣伝、プロモーションといった場面では、立体映像を用いたプレゼンテーションが効果的であると考えられるので、今後立体映像利用への取り組みが増加すると思われる。メンテナンス段階の作業支援に立体映像を利用することは、現状では試行的な検討が行われているのみであるが、多くのアイデアが出されており今後の進展が見込まれる部分である。



立体映像を用いた3次元情報の利用が

◎かなり行われている ○行われている △検討されている

図 5.1-1 製造業における3次元情報の流れと立体映像利用の現状

## 5.2 製造業における立体映像利用の課題

製造業における立体映像利用の課題は、大きく二つある。一つ目の課題は、立体映像の利用が如何にコストの削減や品質向上に結びつくのか、その定量的な評価方法が確立されていないため、製造現場への導入に踏み切る判断が難しいことである。もう一つは、立体映像の品質に関する要求レベルが高いため、現状の立体映像表示装置では必ずしもその仕様を満たしていないことである。

製造の各段階で立体映像を利用することによる定性的なメリットは以下の通りである。まず意匠設計段階では、企画をする側と受け取る側でのイメージの共有、あるいは感性に訴えるデザインのより正確な表現が可能となり、意思決定のスピードアップにつながる。次に詳細設計段階では、分散して設計されたものの全体像の把握に有効であり、調整業務が効率化されると考えられる。これらは試作モデルの製作回数を低減し、直にコスト削減につながる。生産段階では、加工の精密化、作業性の向上により、品質の向上とスピードアップが図られる。また、作業者の教育、訓練の実施によりやはり品質の向上とスピードアップが図られる。販売の段階では、顧客への売り込みに立体映像を利用する結果、売上高の向上、契約率のアップに寄与する。メンテナンス段階では、立体映像の利用によりスピードアップが図られる。

このように、製造業において立体映像を利用することには様々なメリットがあることは明らかであるが、逆に考えると、立体映像を利用しなくては製造業が成り立たない訳ではなく、また立体映像が新たな製品群を創造することに直接はつながらないともいえる。つまり、製造業における立体映像の利用目的は、あくまで生産の効率化を目指したコストの削減にあり、競争を勝ち抜くための手段である。したがって、製造業における立体映像の利用は、効率化が大きな利益をもたらすような、付加価値の高い製品、市場規模の大きな製品、ライフサイクルの短い製品を生産する業種から進行し、それ以外の業種ではなかなか進まないものと考えられる。

製造業の現場から見て、立体映像表示機器に求める仕様のいくつかの代表例を表 5.2-1 に示す。観察者の人数は、個別の設計では一人であるが、イメージを共有して合意形成に利用する場合は、例えば自動車の外観デザインで数人～10人程度、プラント等の大掛かりなシステム設計では数十人になる。一方作業者の訓練や、メンテナンス作業用では一人用で十分である。

表 5.2-1 製造分野で利用される立体映像表示機器仕様例

	自動車の外観デザイン	プラント設計	コピー機メンテナンス
観察者人数	数人～10人	数十人	一人
立体像の大きさ	実物大（数 m）	縮小模型（数十 m）	実物大（数十 cm）
インタラクティブ性	触感の追加	ウォークスルー	検索機能
価格	ある程度高価でも可	かなり高価でも可	低価格でなければ不可
その他の要求・特徴	正確な立体感 高解像度 色の再現性 背景も含めた質感	部品点数が膨大（100万点）	実物との合成

立体像の大きさは、実物大が要求されるものが多いが、プラント設計では縮小して全体を見る場合も多く、また携帯電話等の小型機器では拡大する場合がある。インタラクティブ性は、視点の変更や部品の交換、色の変更等へのリアルタイムな対応はもちろんであるが、触感等五感を使った評価が必要な場面や、ウォークスルー機能が必要な場面も考えられるため、通常のコンピュータのようなキーボード、マウスを使った3次元情報へのアクセス以外に、音声や動作に応じた立体映像への働きかけが重要な要素となろう。製造分野ではこのように、3次元情報へのインターフェースとして、立体映像と他機器とを併用することが多くなると思われる。

立体映像表示システムが採用されるための上限価格は、現状で利用されている平面の表示システムやモックアップとの比較で検討されると考えられるので、例えば全体価格の大きなプラント業界では、数千万円といった高価なものでも利用される可能性がある。しかしながら一般の製造業という観点では、現状のディスプレイシステムと同程度までコストを低下させる必要がある。

その他に要求される性能では、3次元情報を扱うプロフェッショナル（主に3次元CADを用いた設計者）にとっては、長時間作業における疲労の低減が一番の課題になる。それ以外の者にとっては、正確な立体感等の臨場感や、インタラクティブな操作性が重要になる。メンテナンス作業では、設計図や部品在庫の検索機能が必要になる可能性が高く、また実物との合成表示が不可欠である。

製造業の現場から見た立体映像への要求はこのように多様でかつ高度である。現状の立体映像表示機器で、このような仕様を満たしているものは少なく、普及が進まない要因の一つとなっている。

### 5.3 製造業における立体映像利用の展望

前節で指摘したように、製造業における立体映像の利用度合いは、コストとの兼ね合いから決まると考えられるが、もう一つの要素として、現状の製造プロセスとの親和性を考える必要がある。具体的には、3次元 CAD システムによるデジタル化が進んでいる業界への導入が先行すると予測される。すなわち、製造業における立体映像の利用はまず、自動車業界から始まり、次に航空機等の重工業へ進むものと考えられる。家電業界や中小下請けの部品業界で立体映像が利用されるのはかなり先になるであろう。

NC 工作機械や CAD システムが製造工程に変革をもたらし、現在では末端の企業でも利用されるようになったのと同様に、立体映像表示機器が製造業の要求レベルを満たすようになり、かつ一定程度のコストダウンが達成された後には、製造業における立体映像の利用が急速に進展する可能性も高い。これまでの例から推測すると、技術の萌芽から普及に至るまでには 20 年程度の歳月が必要となる。立体映像という具体例を考えると、技術的には既に永い歴史を持ったものであり、また既に普及している 3 次元 CAD システムとの技術的親和性も良いので、普及期間は相当程度短縮されるであろう。いずれにせよ、製造業における立体映像の利用が当たり前になり、製造工程に革新をもたらす日はそう遠くはないものと思われる。

### 第Ⅲ章 医療分野

1	医療分野における3次元映像利用の概要	63
2	医学・看護教育とインフォームド・コンセント	70
3	3次元画像診断と治療支援	85
4	3次元画像のユーザビリティと安全性	113
5	医療分野における3次元画像利用の課題と展望	133

## 第Ⅲ章 医療分野

### 1 医療分野における 3次元映像利用の概要

#### 1.1 はじめに

わが国の医療分野において、3次元画像診断を始めとする3次元映像技術の導入が急速に進んでいる。CT、MRI、超音波検査データを基にした3次元画像診断、3次元内視鏡、仮想（バーチャル）内視鏡、放射線治療計画・手術支援用の3次元画像、そして強化現実感による手術ナビゲーションなど様々な3次元的情報の利用が拡大しつつある。また、3次元映像は全体像をイメージしやすく、直感的にもわかりやすい性質を持っているために、研修医・看護師・学生などの教育や患者へのインフォームド・コンセントなどにも応用されている。このように医療の様々な領域において3次元映像像関連技術が発展しつつある。

しかし、こうした3次元情報の応用が医療の現場でさらに広がるためには様々な問題も存在する。例えば、3次元映像の作成には専門的スキルおよび多大な労力と時間が必要であるし、画像処理のための高性能グラフィックコンピュータ・3D作成ソフト・立体映像呈示システム等の基盤整備、ユーザーにとってインタラクティブで使いやすいインターフェースの開発などは今後の大きな課題である。

本章では医療分野への先進的な3次元映像の応用例を広く紹介するとともに、その技術的問題点と、医療分野における3次元映像関連技術の今後の方向性について検討する。

#### 1.2 医療における 3次元映像利用の現状

医療分野の中で、医学・看護教育とインフォームド・コンセント、3次元画像診断、治療支援などの領域における先進的な3次元映像の利用の現状について概観する。

##### 1.2.1 医学・看護教育とインフォームド・コンセント

最近、医学・看護教育<sup>1)</sup>、インフォームド・コンセント、医療・健康情報の解説などにおいても3次元映像技術が導入されつつある。こうした3次元映像は、必ずしも高解像度のものばかりではなく、自然な立体感を持っていてわかりやすいシンプルなものであるこ

とも少なくない。教育用のものではインタラクティブ性の高いバーチャルリアリティ技術  
を応用したシステムも開発されつつある。

### 1.2.2 3次元画像診断

近年、CT・MRI・超音波などの画像診断装置の性能は飛躍的に進歩した。なかでも1990  
年代末に登場したマルチディテクターCT（以下MD-CT）は、空間分解能・時間分解能を  
飛躍的に向上し、広範囲のボリュームデータを極めて短時間に取得できるため、呼吸性移  
動や拍動などの影響で従来不可能であった心臓・肺・腹部臓器などについても高解像度デ  
ータの取得が可能となった<sup>2)</sup>。MD-CTデータから作成した3次元画像も極めて解像度が  
高く、冠動脈・脳血管・胆管・尿管などの器官の微細な立体構造まで明瞭に描出するこ  
とが可能である<sup>3)</sup>。さらにMD-CTからのCTコロノグラフィー（仮想大腸鏡）<sup>4)</sup>を始めとし  
て、消化管、気管支、血管、胆管、膵管、尿管、脳室などの仮想（バーチャル）内視鏡の  
臨床応用も進んでいる。一方MRIは放射線被曝が無く、組織の様々な特性を画像化でき  
るため、各種臓器の3次元画像診断と治療支援に広く応用されている<sup>5)</sup>。その他にも、超  
音波による臓器および胎児の3次元画像、PET-CTなどによる腫瘍の3次元画像なども臨  
床に応用されつつある。

### 1.2.3 治療支援の3次元映像

低侵襲手術を支援する3次元映像技術としては、内視鏡手術用の3次元内視鏡、ハイビ  
ジョン立体視顕微鏡手術システム、「ダビンチ」などのロボット手術や遠隔手術用の立体視  
などがある。形成外科・歯科・整形外科などにおいてはバーチャルリアリティによる手術  
計画が実用化されている。また、MD-CTやMRIからの3次元映像を実物と統合する強化  
現実感（＝複合現実感）の研究も行われており、手術ナビゲーションに実用されつつある。  
また、脳腫瘍・前立腺癌・肝臓癌などに対してMRIや超音波による2次元画像または  
3次元画像誘導下に正確に腫瘍を穿刺する治療や、MRI画像ガイド下に乳癌や肝臓癌に収  
束超音波を照射する治療なども開発されている<sup>6)</sup>。さらに術中に利用可能なMRIなどの画  
像診断装置と3次元映像を含めた表示システムを組み込んだ手術室が、国立がんセンタ  
ー・東京女子医科大学・東京慈恵会医科大学などにおいて導入されている。

手術以外の治療支援用3次元画像としては、放射線治療における照射野の3次元治療計  
画、高所恐怖症・パニック障害などの不安や恐怖に対しする治療用バーチャルリアリティ

などが試みられている<sup>7)</sup>。詳細は以下の各項で述べられているのでご参照いただきたい。

#### 参考文献

- 1) 中郡聡夫 3D イラストでよくわかる消化器の術式別ケア. 2006年 メディカ出版、大阪.
- 2) 栗林幸夫、佐久間肇編. 心臓血管疾患の MDCT と MRI. 2005年 医学書院、東京.
- 3) 中郡聡夫、盛川浩志、河合隆史、小西 大、高橋進一郎、木下 平. 胆道癌に対する仮想内視鏡と 3次元胆管画像. 臨床消化器内科 2005; 20(7): 971-5
- 4) Pickhardt PJ, Choi JR, Hwang I, et al. Computed tomographic virtual colonoscopy to screen for colorectal neoplasia in asymptomatic adults. N Eng J Med 2003; 349(23): 2191-200
- 5) Jolesz FA. Future perspectives for intraoperative MRI. Neurosurg Clin N Am. 2005;16(1): 201-13
- 6) Jolesz FA, Hynynen K, McDonnold N, et al. Noninvasive thermal ablation of hepatocellular carcinoma by using magnetic resonance imaging-guided focused ultrasound. Gastroenterology. 2004; 127 (5 Suppl 1): S242-7
- 7) 河合隆史. バーチャルリアリティ. 心療内科 2005; 9(3): 207-12

### 1.3 3次元画像の医療分野への応用に関する研究動向

#### 1.3.1 はじめに

本節では、最近の学会活動における3次元画像の活用動向について述べる。医用関係の学会数は多数存在し、その全体を網羅することは難しい。ここでは、「日本コンピュータ外科学会<sup>1)</sup>」を中心に、最近の動向についてまとめた。

#### 1.3.2 日本コンピュータ外科学会について

学会ホームページ「ご挨拶」に『外科分野の治療面、特に手術支援に関してコンピュータ技術を基礎にした各種の最先端医療機器やシステムの調査・研究・情報交換を行うことを目的として活動を行っている学会<sup>1)</sup>』と記されているように、各種外科分野（脳外科、胸部外科、腹部外科、整形外科など）で利用される医療機器について、医学分野（医師や

医療従事者)・工学分野(工学系大学)・産業分野(医療機器メーカー)の研究発表がなされている。その多くは各分野間の連携が図られており、各分野の研究者が共著者として連名されている場合が多い。

この学会を取り上げた理由としては、

- (1) 3次元画像を利用する研究が多い
- (2) 読影方法ではなく、表示内容そのものを取り扱う例が多い
- (3) ロボット技術など、最先端の技術動向が見て取れる
- (4) 発表件数が比較的多い

等があげられる。

後述する「日本生体医工学会<sup>2)</sup>」などでは、生体電流計測(例えば、心電計など)のような画像以外のセッションが多く、3次元画像を取り扱う割合は大きくはない。また、「日本消化器内視鏡学会」などでは、画像(映像)を扱う研究は多いものの、臨床例として静止画像や2次元の映像を提示する場合はほとんどである。

### 1.3.3 研究動向について

図 1.3-1 に、2001 年度から 2005 年度に実施された年次大会での一般講演件数と、その中で 3 次元画像を取り扱った研究、及び、立体視を取り扱った研究の割合を示す。

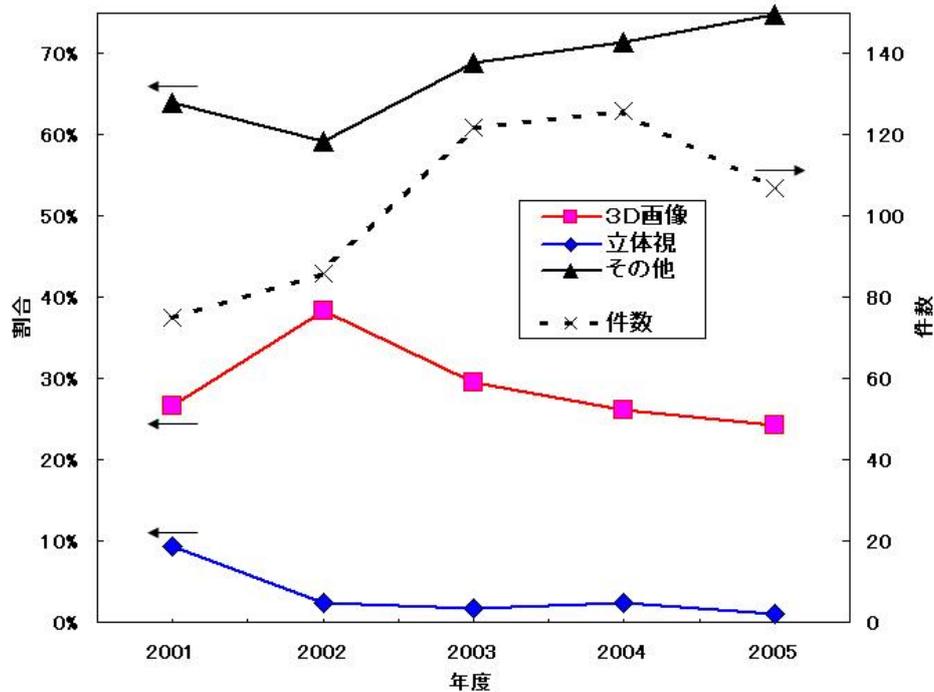


図 1.3-1 日本コンピュータ外科学会に占める 3 次元画像の割合

ここで言う「3次元画像」としては、ボリュームデータを可視化した表示方法を利用している研究、例えば頭蓋骨が2次元モニタ内で奥行き感をもって回転表示される研究を指す。そのため単に超音波画像やX線CT(Computed Tomography)、MRI(Magnetic Resonance Imaging)のスライス画像を用いたものはカウントしていない。「立体視」は、立体視知覚を利用する研究を指している。

2005年度は、医学系学会に多く見られる土日開催ではなく、土日月の開催であった。そのために発表件数が減ったのではないかと思われる(2004年度は金土日開催)。また、ポスター発表が新たに取り入れられた。

3次元画像の件数は、2002年度をピークに僅かな減少傾向が見て取れる。しかしながら1/4以上が3次元画像を利用した研究である。またボリューム表示を利用しない研究を加味すれば、30%以上は3次元画像を用いた研究であると見なすことも出来る。

立体視の利用は少ない。2001年度に比率が多いのは、立体視内視鏡を搭載した手術ロボット「da Vinci」を利用したシステムに関する研究や試用報告が続いたことがあげられる。以後da Vinciは、一般講演以外であることが多い。さらに、国内企業が開発した立体視内視鏡を用いた研究が散見される。

表 1.3-1 には、過去3年分のセッションごとの一般講演件数を示した。

表 1.3-1 日本コンピュータ外科学会の年度別発表件数(一般講演)

セッション分類	2003年度			2004年度			2005年度		
	3D画像	立体視	総数	3D画像	立体視	総数	3D画像	立体視	総数
手術機器・デバイス			14	1		14			22
ロボット・マニピュレータ	1	1	25	5		30		1	22
画像・イメージング	10		14	8		15	6		14
手術場・環境システム			7			11			
手術評価・安全	1	1	7	2	1	10			
内視鏡			6		2	6			
VR・トレーニング	6		11	2		9			
ナビゲーション	8		20	6		14			
セグメンテーション・モデリング	10		13	9		12			
術中支援							8		23
計測									6
手術計画							12		20
胎児外科デバイス						5			
ナノ・再生医療			5						
計	36	2	122	33	3	126	26	1	107

2005年度については、セッションの区分けが前年以前より簡素化されている。また、ポスター発表については区分けがないため、関連が深いと思われる分野に割り付けた。

3次元画像の利用が多いのは、VR(Virtual Reality)・トレーニングや手術計画といった術前の準備に関わる項目と、術中支援やナビゲーション、セグメンテーションなど手術

中での活用項目である。画像・イメージングでも上述した項目への応用に関する研究が多い。一方、手術場・環境システムや手術機器・デバイスのセッションでは、画像そのものを用いた研究はほとんど見られない。

#### 1.3.4 他の学会状況

##### (1) 日本生体医工学会<sup>2)</sup>

日本エム・イー学会が名称変更した学会であり、3次元画像そのものを扱うセッションとしては「VR 応用リハビリテーション」や「コンピュータ外科」があげられるものの、全体に対する割合は低い。

##### (2) 日本 VR 医学会<sup>3)</sup>

比較的若い学会で、2005 年度に第 5 回大会が開催されている。一般講演は 27 件で、8 件の 3 次元画像利用と 4 件の立体視利用研究がある。3 次元画像の比率は 30% と多い。CT 画像から再構成したバーチャル内視鏡映像の利用などがあげられる。VR としては、力覚提示など画像を利用しない研究も多くなっている。

##### (3) 日本バーチャルリアリティ学会<sup>4)</sup>

##### (4) 3次元画像コンファレンス<sup>5)</sup>

いずれも、3次元画像や立体視を利用する研究を多く扱っているが、医療応用についての件数は少ない。前述した学会などで発表の機会が増したために移ったとも考えられる。

##### (5) その他の学会

参考文献に記した学会<sup>6~8)</sup>でも、3次元画像が取り扱われる研究は散見される。コンピュータ支援画像診断学会は、年次大会が日本コンピュータ外科学会と合同で開催されるため、読影に関する研究が多くなっているようである。

#### 1.3.5 おわりに

学会における研究動向について、まとめた。個々の研究推移などは記せなかったが、代表的な 3 次元画像を用いる研究やその成果については、次節以降で取り上げられ詳細が述

べられている。

#### 参考文献

- 1) 日本コンピュータ外科学会 (JSCAS Japan Society of Computer Aided Surgery)  
<http://www.atl.n.dendai.ac.jp/jscas/>
- 2) 日本生体医工学会 (JSMBE Japanese Society for Medical and Biological Engineering) 旧日本エム・イー学会 <http://www.jsmbe.or.jp/>
- 3) 日本 VR 医学会 (Japanese Society for Medical Virtual Reality)  
<http://www.jsmvr.umin.ne.jp/index.html>
- 4) 日本バーチャルリアリティ学会 (The Virtual Reality Society of Japan)  
<http://www.vrsj.org/main.html>
- 5) 3次元画像コンファレンス <http://www.3d-conf.org/>
- 6) コンピュータ支援画像診断学会 (CADM Computer Aided Diagnosis of Medical Images) <http://www.toriwaki.nuie.nagoya-u.ac.jp/~cadm/japanese/>
- 7) 日本医用画像工学会 (JAMIT Japanese Society of Medical Imaging Technology)  
[http://www.jamit.jp/index\\_j.htm](http://www.jamit.jp/index_j.htm)
- 8) 医用画像情報学会 (MII Medical Imaging and Information Sciences)  
<http://www.mii-sci.jp/>

## 2 医学・看護教育とインフォームド・コンセント

### 2.1 3次元映像を用いた外科手術教育

#### 2.1.1 3次元情報を用いた医学教育

医療分野におけるインタラクティブな3次元情報の教育への応用では、大きく触覚情報の呈示に重点を置いた取り組みと、視覚情報の呈示に重点を置いたものの2種類に分けられる。前者の最近の例として、例えば喜多村による解剖訓練システム<sup>1)</sup>や服部らによる臓器の柔らかさを表現するシミュレーションシステム<sup>2)</sup>、前田らによる注射シミュレータ<sup>3)</sup>、徳安らや Nakao らによる心臓の触診シミュレータ<sup>4,5)</sup>などがあげられる。一方、外科手技を学ぶための視覚情報の呈示にかかる問題として、次の3点が指摘されている。

- (1) 実際の手術場を供覧する場合、希な症例に当たる医師と当たらない医師があって、教育機会の不均等が生ずること。
- (2) 2次元の視覚情報だけでは、臓器等の微妙な位置関係が把握しにくいこと。
- (3) 供覧・教材のいずれもが、術者の視野と異なること。

そのため、3次元情報の視覚表現の有効が示唆され、中でも立体映像を用いた取り組みに期待が集まっている。当該分野の先行事例では、モデリングされた3次元コンピュータグラフィクス(3DCG)<sup>6~8)</sup>や2次元画像の再構築によるもの<sup>9,10)</sup>が多く、ユーザが手術室内の少人数に限られる場合も多い<sup>11~13)</sup>。筆者らは、術者の視点から手技を供覧することを目的とした教育用立体映像コンテンツを、1995年より千葉大学第2外科、国立がんセンター東病院と共同で制作を行ってきた<sup>14~16)</sup>(図2.1-1)。近年では、ドイツ・アーヘン工科大学との連携による、耳鼻咽喉科向けの教育用立体映像コンテンツの制作を進めている<sup>17)</sup>。本稿では、こうした取り組みの概要について紹介する。



図 2.1-1 筆者らによる立体映像コンテンツの収録(左)および公開(右)の様子(1996年)

## 2.1.2 外科手技教育用立体映像コンテンツの制作

立体映像の呈示環境として、最近では、安価な時分割方式や偏光方式の呈示デバイスや、裸眼式立体ディスプレイを搭載したパーソナルコンピュータ（PC）が、市販されるようになってきた。そこで筆者らは、コンテンツの機能性や実用性を重視し、標準的な PC で再生可能な、実写型の外科手技教育用立体映像コンテンツの制作と評価を行っている。

本稿で紹介する立体映像ソースは、アーヘン大学病院にて撮影された。具体的には、2台の3CCDカメラ（mediLive, Zeiss）を、耳鼻咽喉科の手術用顕微鏡（ProMagis, Zeiss）のビームスプリッタに装着し、収録した（図 2.1-2）。収録には、2台の DVCam の VTR を使用し、ビデオ信号は PAL 形式（25FPS, 720×576 pixels）で記録した。本取り組みでは、耳鼻咽喉科における標準的な術式として、まず以下の3例を撮影した。収録されたソースから、各術式について外科手技教育の観点で複数のビデオクリップが抽出された。

- ・ 鼓室形成術（a “Tympanoplasty Type III”）
- ・ 顕微鏡下副鼻腔手術（a microscopic paranasal sinus operation）
- ・ レーザーを用いた声帯切除術（a CO2 laser chordectomy）

立体映像コンテンツの編集では、各クリップの立体感の調整と、ビデオフォーマットの変換を行った。立体感の調整においては、筆者らの開発した立体映像編集用ソフトウェア「StereoEdit（レッツ・コーポレーション）」を使用した<sup>18)</sup>。当該ソフトウェアを利用して、適正な術野の奥行き感や、快適な立体感を表現するために、視差量を調整し、必要な映像範囲のトリミングを行った。同時に、撮影時に発生した垂直視差や、被写体のサイズの補正も行った（図 2.1-3）。



図 2.1-2 コンテンツの収録風景

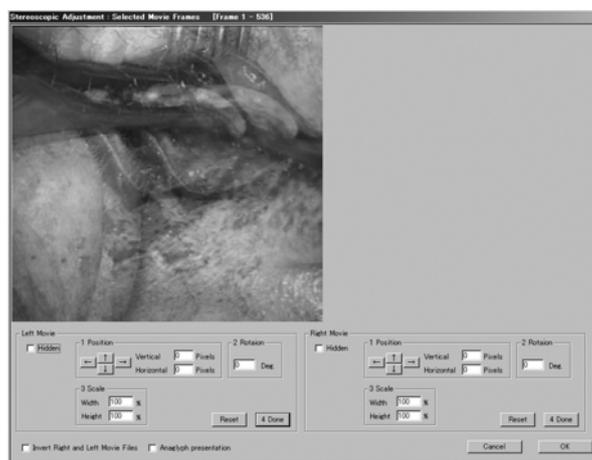


図 2.1-3 コンテンツの編集画面

次に、ビデオフォーマットの変換は、特定のビデオ信号や表示方式に依存しないで立体

映像を呈示するために、立体映像の表示ソフトウェア「DepthCharge（米 VRex 社）」向けに行った。DepthCharge は、ユーザの立体表示方式に応じてコンテンツをコンバートし、ウェブブラウザ上に表示するソフトウェアである<sup>19)</sup>。編集済みのクリップを、DepthCharge を用いて表示するために、Side by Side 形式に変換した。そして、ブラウザ上でストリーミング再生できるように、Windows Media フォーマットに変換し、HTML を用いてオーサリングを行った。

### 2.1.3 外科手技教育用立体映像コンテンツの評価

制作したコンテンツの評価は、アーヘン大学病院の医学生 16 名を対象として行った。標準的な Windows PC、ウェブブラウザ、および Vrex Depth Charge browser plug-in を用いてコンテンツを呈示した。立体映像の表示方式としては、17 インチの CRT モニタと液晶シャッターメガネを用いた時分割方式と、15 インチの液晶モニタにマイクロポール<sup>20)</sup>を付加した偏光方式の 2 種類を選択した（図 2.1-4）。

評価方法としては、鼓室形成術より制作者側の評価が分かれた 4 種類のクリップ（#23 : Excellent, #16 : Good, #4 : Poor, #21 : Bad）を対象とし、奥行き感、解像度、全体的な画質（輝度、コントラスト、色彩等）および観察後の眼精疲労について 5 件法で回答を求めると同時に、立体視形成にかかる所要時間を評価者の口頭での申告により計測した。さらに、2 つのクリップで切除される耳珠軟骨の奥行き距離（#23 の実測値 : 13 mm, #24 : 18 mm）について目測での回答を求めた（図 2.1-5）。

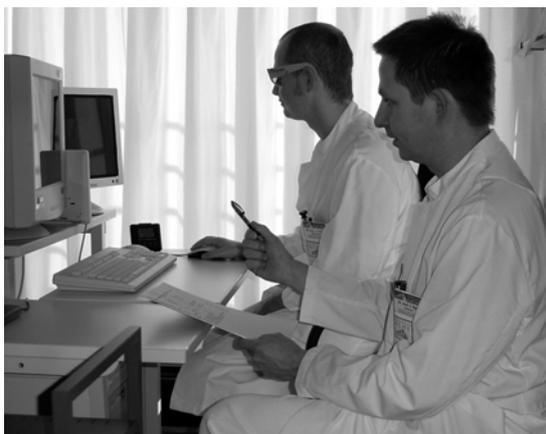


図 2.1-4 コンテンツ評価の様子

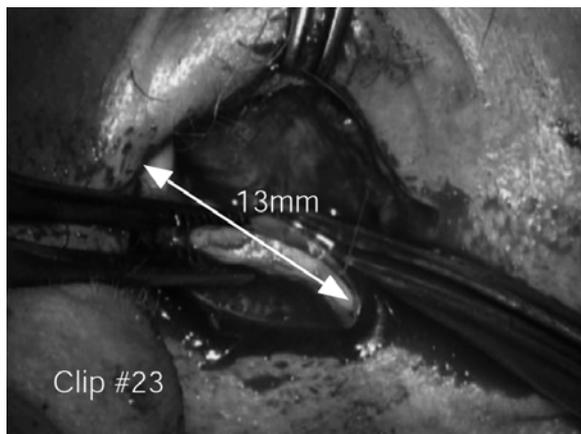


図 2.1-5 クリップ #24 での耳珠軟骨切除

結果から、今回制作したコンテンツの立体情報は、全ての被験者により有益という回答が得られた。画質や奥行き感の点で制作者側の評価が高かったクリップ（#23, #16）は、

評価者にも高い評定点が与えられていた。一方、過度の視差量等の点で制作者側の評価が低かったクリップ（#4, #21）においても、評価者側によって著しく低い評定点が与えられることはなかった（図 2.1-6）。また、疲労感については、呈示時間よりもコンテンツの奥行き感との関連が深いと考えられた。さらに、立体映像の表示方式としては、クロストークの少ない時分割方式の方が短時間で立体視が形成される傾向にあったが、奥行き距離の推定では画面サイズが小さいにもかかわらず偏光方式の方がやや実測値と近似な結果となった（図 2.1-7）。これは、いずれもインターリーブ表示であったため、時分割方式の方が時間的な情報量が少なかったことが原因と考えられた。

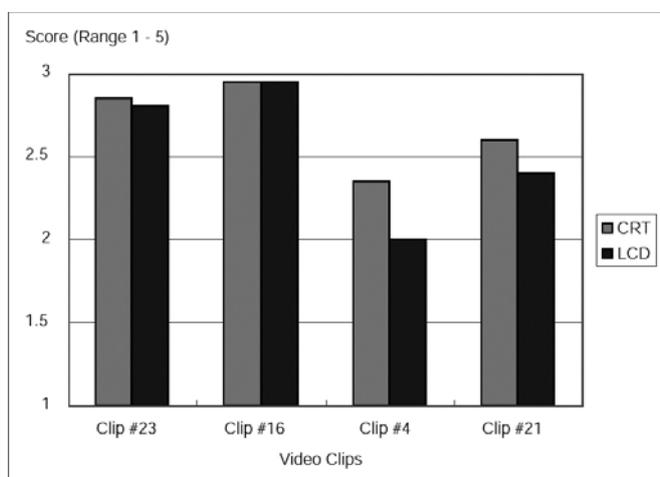


図 2.1-6 全体的な印象の評価結果

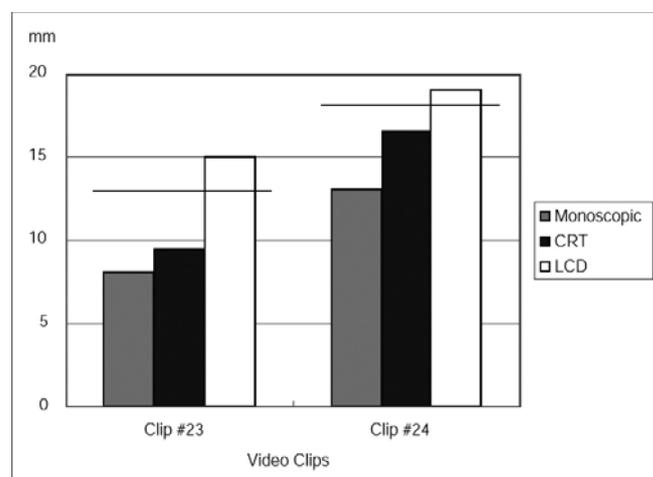


図 2.1-7 耳珠軟骨切除の奥行き距離推定

## 2.1.4 まとめ

本稿では、3次元映像を用いた外科手術教育として、特に耳鼻咽喉科分野における外科手技教育を目的とした立体映像コンテンツの制作と評価にかかる、筆者らの取り組みについて述べた。これまでの結果としては、医学生による積極的な評価が得られており、現在は、裸眼立体ディスプレイへの適用や、ハイビジョン品質のコンテンツ制作に取り組んでいる。耳と鼻、喉は、いわば人体に開いた穴であり、その性質上、水平・垂直方向に加えて奥行き情報の把握が重要となる。そのため、外科手技教育においては、特に立体視の有効な領域と考えている。同様に、内視鏡や顕微鏡を用いた手技の教育も、対象として有効であると考えられる。市場性としては、ネットワークを介した立体映像の教育利用が期待されるが、標準化を含め、医師が簡易にコンテンツを制作・呈示可能な環境の整備が課題として残されている。さらに、インタラクティブ性の付加によるコンテンツとしての高度化と、その教育効果の評価も、今後の課題と考えている。

## 参考文献

- 1) 喜多村直：触わる解剖訓練システムの開発と効用，バイオエンジニアリング学術講演会講演論文集，Vol.16，347-348（2004）
- 2) 服部麻木，鈴木直樹，鈴木薫之：バーチャルリアリティ技術を応用した手術シミュレーションシステム，耳鼻咽喉科展望，Vol.47，No.5，345-347（2004）
- 3) 前田賢志，酒井英典，宮崎健太，坂口正道，佐野明人，藤本英雄：注射シミュレータのための柔軟物変形力覚計測，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集，Vol.2004，2P1-H-3（2004）
- 4) 徳安達士，喜多村直，坂口元一，米田正始：ロボティックバーチャルリアリティとシステムインテグレーション 仮想心臓モデルとハプティックデバイスによる心筋触診訓練システムの開発，計測自動制御学会論文集，Vol.40，No.2，148-154（2004）
- 5) M. Nakao, T. Kuroda, M. Komori, H. Oyama: Evaluation and User Study of Haptic Simulator for Learning Palpation in Cardiovascular Surgery, Int Conf Artif Real Telexistence, Vol.13, 203-208（2003）
- 6) V.P. Goes, L.S. Machado, 他: Interactive stereoscopic full-color direct volume visualization for virtual reality applications in medicine, StudHealth Technol Inform, 81, pp.161-167（2001）
- 7) S. Jiang, P. Dai, Y. Liu: 3-D morphological study of the temporal bone, Zhonghua Yi Xue Za Zhi, 77(8), pp.579-582（1997）
- 8) J. Talairach, G. Szikla: Application of stereotactic concepts to the surgery of epilepsy, Acta Neurochir Suppl, 30, pp.35-54（1980）
- 9) K. Verstreken, J. van Cleynenbreugel, 他: Computer-assisted planning of oral implant surgery. An approach using virtual reality, Stud Health Technol Inform, 29, pp.423-434（1996）
- 10) J.E. Hardy, S.R. Dodds, 他: An objective evaluation of the effectiveness of different methods of displaying three-dimensional information with medical x-ray images, Invest Radiol, 31(7), pp.433-445（1996）
- 11) C. Kaufmann, P. Rhee, 他: Telepresence surgery system enhances medical student surgery training, Stud Health Technol Inform, 62, pp.174-178（1999）
- 12) T.A. Hernes, S. Ommedal, 他: Stereoscopic navigation \_ controlled display of preoperative MRI and intraoperative 3D ultrasound in planning and guidance of

neurosurgery: new technology for minimally invasive image-guided surgery approaches, *Minim Invasive Neurosurg*, 46(3), pp.129-137 (2003)

- 13) L. Muhlbach, M. Bocker, 他 : Telepresence in videocommunications: a study on stereoscopy and individual eye contact, *Hum Factors*, 37(2), pp.290-305 (1995)
- 14) 河合隆史, 野呂影勇, 他 : 外科手術教育用二眼式立体映像システム, *日本コンピュータ支援外科学会誌*, Vol.4, No.2, pp.11-14 (1996)
- 15) 中郡聡夫, 河合隆史, 他 : 外科教育とコンピュータ外科, *BME*, 11 (8) , pp.78-80 (1997)
- 16) 河合隆史, 野呂影勇 : 外科手技教育と立体映像システム, *医科器械学*, 69 (3) , pp.130-134 (1999)
- 17) J. Ilgner, T. Kawai, M. Wethofen, T. Shibata : Production and evaluation of stereoscopic video presentation in surgical training, *SPIE*, 5291, pp.293-302 (2004)
- 18) 河合, 柴田, 他 : 立体映像のノンリニア編集用ソフトウェアの開発, *映像情報メディア学会誌*, 57(2), pp.247-252 (2003)
- 19) <http://www.vrex.com/depthcharge/index.htm>
- 20) 松廣 :  $\mu$  Pol (マイクロポール) システム, *コンバーテック*, 28(8), pp.2-5 (2000)

## 2.2 シミュレータを用いた内視鏡外科手術トレーニングの有用性に関する検討

### 2.2.1 背景

近年の内視鏡外科手術の発展・普及はめざましく、新しい医療機器や治療技術の開発により外科治療学そのものが大きく変わりつつある。しかし、外科医を教育し、また技術を認定する社会環境の整備は不十分で、最近内視鏡外科手術に対する理解や認識の不足、未熟な技術に起因する医療事故が相次ぎ、社会的にも問題になっている。このような現況下で、専門的トレーニングの必要性は論を待たないところである。今回我々は、医学生を被験者として内視鏡外科手術におけるシミュレータを用いたトレーニングの有用性を検討した。

## 2.2.2 対象および方法

手術経験のない医学生 30 人を封筒法にて無作為にシミュレータ群 (SIM ; 20 例)、対照群 (CTR ; 10 例) に分けた。まずボックスにて、全員同じタスク (持針器、受針器を用いてのドット間の縫合、2 回結紮) を行って操作時間や正確性 (エラー : 刺入点のずれ、破れ、糸の緩み) を評価した(図 2.2-1)。

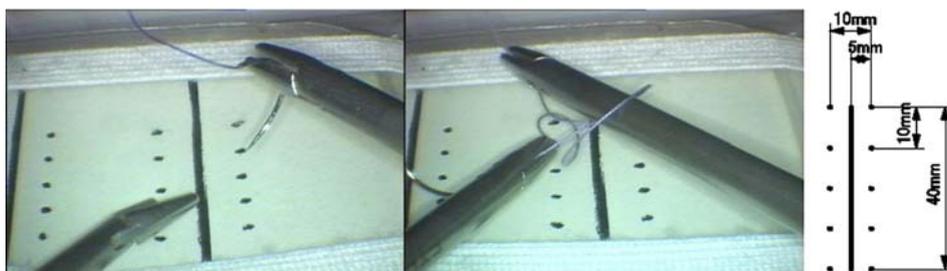


図 2.2-1 評価タスク ゴムシート上のドット間に正確に針をかけ、2 回結紮する。

同タスクはビデオに録画され、磁気式 3 次元位置計測装置 (AURORA、NDI, Ltd., Canada) にて左右鉗子操作の軌跡を記録した。前評価後、SIM 群はシミュレータ (ProcedicusMIST、Mentice AB, Gothenburg, Sweden) (図 2.2-2) を用いて 2 時間/日×2 日トレーニングを行い(表 2.2-1)、対照群は 30 分のビデオによる教育のみとした。SIM 群のトレーニング内容は、第 1 段階として、空間認知や左右鉗子のコンビネーションを訓練するタスクを 3 種類指定し、決められたスコアをクリアするまで繰り返してトレーニングを行った。第 2 段階では段階的な Suturing の VR トレーニングを、決められたスコアを目標に繰り返してトレーニングを行った(表 2.2-2)。トレーニング後前評価と同様のタスクにて再評価を行った。



図 2.2-2 シミュレータによる VR トレーニング

訓練者はコンピュータのプログラムに沿って訓練することができる。

表 2.2-1 MSIT™から選択した訓練一覧

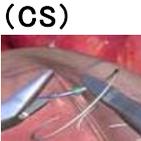
訓練能力	訓練名		
位置・空間認識 運動能力	<b>Transfer Place (TP) ※</b>  物体を左右の鉗子で受け渡す。	<b>Traversal (Tv) ※</b>  物体を左右の鉗子で手繰り寄せる。	<b>Stretch Diathermy (SD)</b>  物体を把持しながら、フック型電極で剥離を行う。
縫合・結紮 内視鏡基本操作	<b>Adjust Needle (AN)</b>  針の向きを変える。	<b>Push Needle (PN)</b>  針の向きを変える。	<b>Stitch (St)</b>  針を刺し、抜き取る。
	<b>Lift Stitch (LS)</b>  物体を把持しながら、針を刺し、抜き取る	<b>Continuous Suture (CS)</b>  連続縫合を行う。	<b>Square Knot (SK)</b>  平結びを作る。
	<b>Interrupted Suture (IS)</b>  縫合・結紮を行う。		

表 2.2-2 各群のトレーニング前後のエラー発生率

	CTR (%)	SIM (%)	
ゴムの破れ	Before	18.8	10.0
	After	25.0	5.0
糸の緩み	Before	18.8	45.0
	After	25.0	15.0

### 2.2.3 結果

トレーニング前評価の全操作時間の平均は、CTR 群 410.4±123.4 秒、SIM 群 382.8±148.1 秒で、両群間に有意差を認めなかった。トレーニング後評価の全操作時間の平均は、CTR 群 343.0±92.0 秒、SIM 群 200.9±82.2 秒で、両群とも全評価に比べて有意に短くなっていた ( $p<0.05$ )。トレーニング前後の全操作時間の改善率は、SIM 群 47.5%で、CTR 群 (18.5%) に比べて有意に高かった ( $p<0.01$ )。操作の内容別で、SIM 群の針保持～刺入時間および結紮時間の改善率は CTR 群に比べて著明に改善がみられた (SIM 群:66.2%、42.8%、CTR 群 : 29.3%、24.1%) (図 2.2-3)。

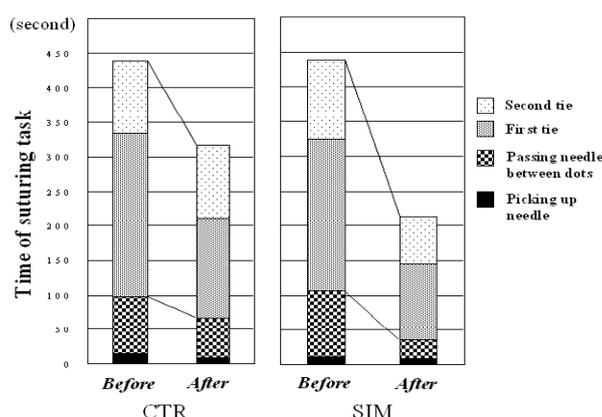


図 2.2-3 各群のトレーニング前後の評価タスク遂行時間

破れおよびずれのエラー発生率は、CTR 群ではトレーニング前後で有意差なく、SIM 群ではトレーニング後減少した ( $p<0.05$ ) (図 2.2-3)。左右鉗子の軌跡の解析では明らかな傾向は認めなかった。

### 2.2.4 考察

欧米の内視鏡外科手術の教育・トレーニングは我が国に比べて進んでおり、ストラスブル (フランス) の European Institute of Telesurgery (EITS) や、カセレス (スペイン) の Minimally Invasive Surgery Center (MISC) など、世界中から受講者が集まる施設も存在する。また、内視鏡外科手術の教育・トレーニングに関する論文も多く、ボックストレーニングにおける多数のタスクに関しても、トレーニング効果を示す報告がなされている。Virtual reality によるシミュレータは多く利用されており、数種類のシミュレータに関してはトレーニング効果が良好であるとの報告がなされている。スウェーデンのカロリ

ンスカ医科大学ではシミュレータによる内視鏡外科手術教育が最も進んでおり、医学生、若手外科医に対してシミュレータによるトレーニングが義務化されている。特に外科医では、シミュレータによるスコアが一定基準を満たさなければ実際の内視鏡外科手術は行えないことになっている。本試験では、ビデオを見るだけの教育でも効果を認めたものの、シミュレータによるトレーニングは有意にそれ以上の効果を認めた。今回設定した評価タスクは、針を拾って適正な位置・角度で保持する、定められたドットに針を刺入し、さらに両鉗子で結紮する、といった操作で、この中に空間認知力、組織把持、左右鉗子のコンビネーションなど内視鏡外科手術において必要な基本手技が多く含まれおり、評価タスクとして妥当と考えられる。また、シミュレータによるトレーニングの利点として、(1) 行った各タスクに対するスコアが算定されるので、上達の程度を数値で理解できる、(2) 各自のスコアはコンピュータ内に保存され、客観的な個々の比較や、全体の経時的な上達度など、データ解析が可能である、(3) 指導者がそばにいて指導しなくてもトレーニングできる、(4) 針や糸などが不要である、などが挙げられる。SIM 群における針保持～刺入時間の改善率が著明に高かったことより、VR トレーニングでも空間認知や左右のコンビネーションの上達には非常に有用であると考えられた。第 2 段階の suturing トレーニングも、針を持つところから結紮まで段階的に訓練でき、針や糸を把持する場所、鉗子を回転する方向、糸の端をおく場所まで、細かく指示してくれるので、縫合結紮の手順の理解や、イメージ付けには非常に有用と考えられた。また、このシミュレータには誤った場所を把持したり、力が誤った方向へ向くと鉗子が赤くなるアラーム機能を有しており、本試験のエラー発生率軽減に有効であったと考えられた。この機能は内視鏡下操作を安全に行う手技を体得する上で重要であると考えられた。今回使用したシミュレータには haptic 機能は備わっていなかったが、内視鏡外科手術の基本手技体得目的では、十分にトレーニング効果を認めることができた。

また、市場の見地からのVRシミュレータの今後については、価格が高いというデメリットがある反面、我が国でも効果的なトレーニング方法や評価方などの研究が積極的に行われはじめ、さらによりリアルで豊富なソフトウェアの開発が年々進んでいることから、今後ますますの普及が見込まれる。

## 結 言

内視鏡外科手術におけるシミュレータトレーニングは有用であると考えられた。特に、シミュレータによるエラーチェック機能は内視鏡下操作を安全に行う手技を体得する上で重要であると考えられた。

## 2.2.5 九州大学病院内視鏡外科手術トレーニングセンターの設立

九州大学病院では、平成 16 年 12 月に内視鏡外科手術トレーニングセンターを設立した。講義室、動物実験施設に加えて、トレーニングボックス (Endowork-pro II: MC Medical 社)、シミュレータ (LapSim: Surgical Science 社、MIST: Mentice 社、LapMentor: Symbionix 社) を備え、ドライトレーニング施設も充実している。我々は、先述したトレーニング効果試験の結果をふまえてカリキュラムを作成し、平成 16 年 2 月より月 1 回のペースで基本手技の習得を目的としたスタンダードコースを開始した。2 日間コースで、1 日目はボックス、シミュレータを用いたドライトレーニングで、2 日目はドライトレーニングに加えて、動物を用いた剥離、血管処理、縫合・結紮などの実践的トレーニング、さらに腹腔鏡の操作法、助手の視野展開法までトレーニングでき、充実したカリキュラムとなっている。

### 参考文献

- 1) A.G.Gallgher, et al., Discriminative validity of the Minimally Invasive Surgical Trainer in Virtual Reality (MIST-VR) using criteria levels based on expert performance, Surg Endosc (2004) 18, 660-665
- 2) Neal E, et al., Virtual Reality Training Improves Operating Room Performance, Annals of Surgery, Vol.236, No.4, 458-464

## 2.3 インフォームド・コンセント用 3次元 CG アニメーション

### 2.3.1 手術に対するインフォームド・コンセントの現状とオペアニメ開発の動機

医療行為を行うには、患者がその医療行為を承諾していることが絶対に必要である。そこで現在では、医師は治療内容を患者に説明してインフォームド・コンセント（以下 IC）を得た上で、患者の自己決定権を十分尊重して治療法を選択することが一般的となっている。さらに医師には、治療に関連する危険性や、それ以外に選択し得る治療法などについても十分説明する義務があるとされる。

外科手術の IC においては、手術内容を良く理解してもらうことが極めて重要である。なぜなら、手術方法自体が術後の合併症と極めて密接に関わっているからである。また、手術による体内の変化を知ることは、術後のリハビリテーションやその後の治療法を選択する上でも極めて重要である。しかし口頭での説明や専門的な資料の呈示を受けても、患者は必ずしも医学的知識を十分持っているわけではないため、複雑な手術内容を良く理解できない可能性がある。その結果、時として手術内容を理解できないまま手術を受けてしまうことがある。逆に医師も患者が手術内容を十分理解していないことに気づかない可能性がある。

こうした手術における IC の問題点を改善するために、国立がんセンター東病院上腹部外科、早稲田大学国際情報通信研究科河合研究室、株式会社メディアグループは共同して、手術の IC に役立つツールとして手術アニメーション OpeAnime（以下オペアニメ）を開発した<sup>1~3)</sup>。

### 2.3.2 オペアニメの特徴と収録術式

オペアニメは主にながんに対する外科手術の 3DCG アニメーションである。このオペアニメの最大の特徴は、手術における臓器の変化を誰にでもわかりやすく立体的に呈示していることである。臓器と病変を中心とした比較的シンプルな CG であるために、わかりやすく、気持ち悪くない利点もある。また、医師にとっても、患部の切除・臓器の再建などの手術の要点を説明しやすいように構成されている。1 術式を約 1 分程度と短時間に編集してあるので、何度でも繰り返し見ることも可能である。なおオペアニメは経済産業省の「2002 年度次世代デジタルコンテンツ制作支援事業」に認定されている。

製品版には以下の 16 術式のアニメーションが収録されている（表 2.3-1）。

表 2.3-1

1	幽門側胃切除術
2	胃全摘術
3	噴門側胃切除術
4	右肝切除術
5	左肝切除術
6	拡大右肝切除術
7	肝部分切除術
8	亜全胃温存膵頭十二指腸切除術
9	膵体尾部切除術
10	胸部食道全摘術
11	右結腸切除術
12	S状結腸切除術
13	低位前方切除術
14	直腸切断術
15	乳房温存手術
16	腹腔鏡下胆嚢摘出術

### 2.3.3 オペアニメの画像構成

オペアニメでは、手術における臓器の経時的変化をアニメーションで示している。ここでは、オペアニメの収録術式の中から亜全胃温存膵頭十二指腸切除術の画像を用いて手術アニメーションの内容を具体的に呈示する。なお、この手術は膵頭部癌・下部胆管癌・十二指腸乳頭部癌などに対して行われる手術である。

最初に、臓器と病変の全体像を立体的に呈示している。全体像を見ることにより、臓器と病変に対する明確な視覚的イメージを持つことが可能となり、それによって手術による臓器の変化をよりリアリティを持って理解しやすくなると思われる。図 2.3-1 では膵頭部癌と、総胆管、主膵管、副膵管、十二指腸、門脈などの膵頭部付近の構造を示している。図 2.3-2 は膵頭部をさらに拡大したイメージであり、膵頭部のより詳細な構造が呈示されている。そして、主膵管・総胆管が膵頭部を通過して十二指腸に通じていること、門脈／上腸間膜静脈が膵臓の背面を通過していることなどが示されている。

次いで、膵頭部の切除をアニメーションで呈示している。胃、総胆管、膵を切離し、膵頭部・十二指腸・胃の一部・小腸の一部・胆嚢・総胆管を一括して摘出する手術の過程を動画で示している（図 2.3-3）。切除後の再建は、患者にとって最も理解の難しいポイントの一つである。オペアニメでは臓器の変化を経時的かつ立体的に示しているため、解剖学

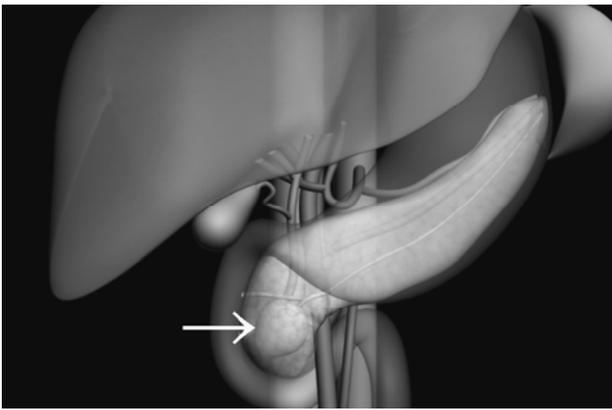


図 2.3-1 膵頭部癌（矢印）と周囲臓器

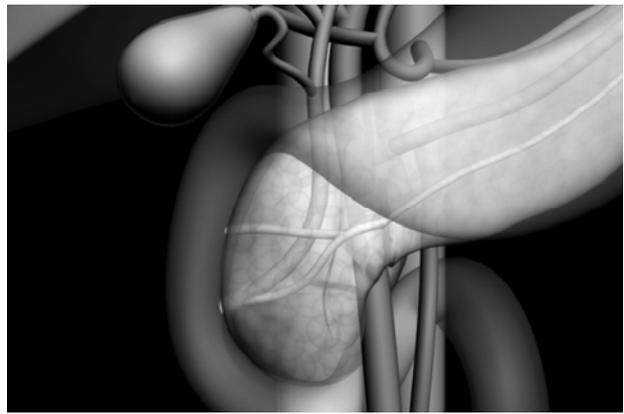


図 2.3-2 膵頭部の拡大イメージ

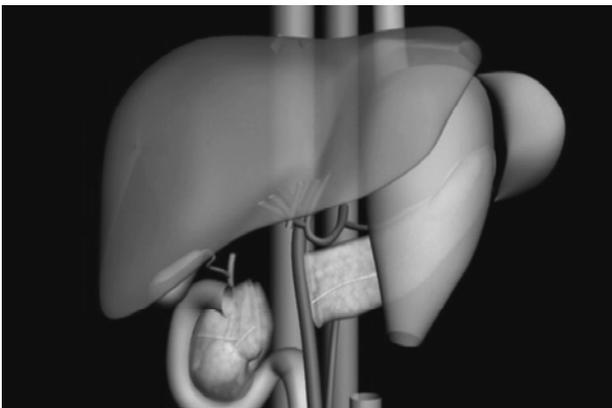


図 2.3-3 膵頭部の切除イメージ

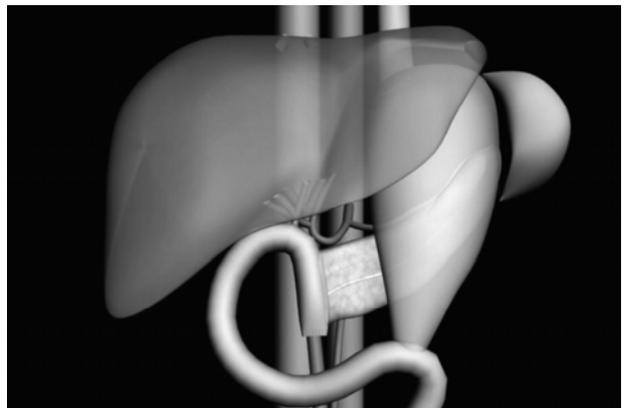


図 2.3-4 切除後の再建イメージ

的な知識がそれほど多くなくても、再建した臓器の関係がわかりやすい。図 2.3-4 は亜全胃温存膵頭十二指腸切除後の再建を示している。この図では膵臓と空腸、胆管と空腸、胃と空腸の吻合を呈示している。

消化器外科の手術では、吻合部や臓器の切離部にドレーンを入れることが一般的である。そこでオペアニメでは、再建部位とドレーンの関係を示すアニメーションも作成した。図 2.3-5 は亜全胃温存膵頭十二指腸切除後の膵空腸吻合部ドレーンと胆管空腸吻合部ドレーン、および膵管内と胆管内に入れたステントチューブを示した画像である。これにより、ドレーンの位置と体表の創との関係などを視覚的に理解することが可能である。オペアニメでは、最後に体表から創とドレーンを見た体表の画像（体表図）を呈示した。図 2.3-6 は亜全胃温存膵頭十二指腸切除後の正中創とドレーン・チューブ類などの体表図を示している。オペアニメの最後にはさらに患者自身の視点からの画像も呈示して自分のボディイメージを持ちやすくなるよう工夫した。

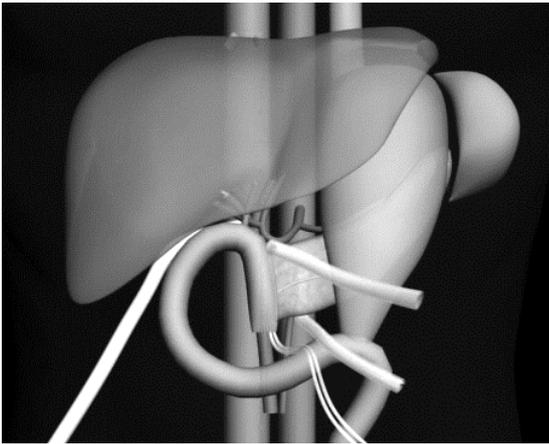


図 2.3-5 ドレーンのイメージ

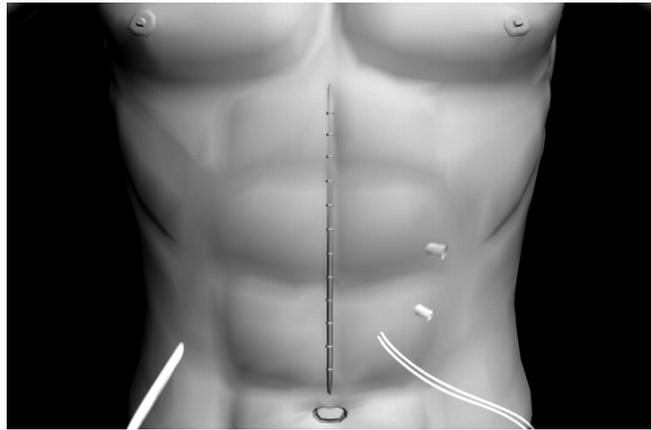


図 2.3-6 体表図

### 2.3.4 オペアニメの評価と今後の展望

このオペアニメの画像の一部は、インターネット上で閲覧することが可能である<sup>1)</sup>。オペアニメを見た人の意見をアンケート集計したところ、手術内容が立体的でわかりやすい、自分の受けた手術内容がやっと理解できた、繰り返し見ることでわかるのでわかりやすかったなどという感想が多かった。私がオペアニメを使用して手術の説明している時の印象もほぼ同様で、多くの方が「わかりやすい」と感じているようである。ただし、高齢の方の一部ではアニメーションの早さについて行けない人がいるので、途中で動画を止めて説明するか、または繰り返しアニメーションを見るなどの工夫をする必要がある。

日本は現在未曾有の健康ブームである。医学・健康情報の解説および IC を目的とした 3次元画像コンテンツの開発には今後十分な市場性が期待できると思われる<sup>2,3)</sup>。今後我々も、小手術のアニメーションや、内視鏡検査などのアニメーションなども制作して、病院での IC に広く応用できるツールとしてさらに発展させたいと考えている。

今回掲載した図には、国立がんセンター東病院、早稲田大学国際情報通信研究科河合隆史研究室と（株）メディアグルーで共同開発した「OpeAnime」の一部を使用している。

#### 参考文献

- 1) OpeAime ホームページ. <http://www.mediagluco.co.jp/ooperand/>
- 2) 中郡聡夫, 河合隆史, 伊藤朝香他. がん手術の IC を目的とした手術アニメーション「OpeAnime」の開発と使用経験. 臨床外科 2005 ; 60(9): 1105-8
- 3) 中郡聡夫 3D イラストでよくわかる消化器の術式別ケア. 2006年 メディカ出版、大阪

### 3 3次元画像診断と治療支援

#### 3.1 CT・MRI からの3次元画像診断

##### 3.1.1 CTにおける技術進歩

従来のCTは、一对の管球と検出器が被験者の周囲を一回転することにより一枚の横断像を得ていたが、管球が連続的に回転しているうちに被験者がのっているベッドを移動させ、連続性のある横断像を得ることができるようになった。いわゆるスパイラルCTと呼ばれる技術である。本法により横断像から矢状断や冠状断など任意の方向の断面を得ることが可能になったが、撮像範囲が限られること、各スライスの体軸方向の厚みが厚く、再構成してもスライス間に段々のような不連続性が生じるなどの欠点があった。1998年頃からは、検出器を複数ならべて、一回の回転でより広範囲の画像情報を得ることが可能となった。これをMulti-detector row CT (MDCT) あるいはMulti slice CT (MSCT) と呼ぶ。検出器は4列から8列、16列と増え、2004年からは64列のMDCTが各メーカーから市場に導入されるに至った。この結果、広範囲をカバーすると同時に、スライスの厚さも薄くすることができるようになった。体軸方向のスライスの厚みが横断面における空間分解能とほぼ等しい、いわゆる等方向性データ isotropic data を得ることにより、任意の方向に画像を再構成しても段差のないスムーズな画像が得られる。CTでは組織コントラストをつけるために造影剤を使用することが多いが、血管、特に動脈内の造影剤濃度が高いうちに頸部から足先までの広範囲を撮像することが可能となり、CT血管造影の画質が飛躍的に向上した。

##### 3.1.2 MRIにおける技術進歩

MRIにおいても撮像装置の傾斜磁場性能の向上や、高速撮像シーケンス、3次元データ収集、画像処理法の開発などを利用した、空間分解能改善の努力が続けられている。しかし、MRIの場合は一般的には空間分解能をあげると撮像時間延長をきたしてしまうので、空間分解能の改善には限界がある。これを、パラレルイメーシングと呼ばれる、データ収集の回数を少なくする工夫やデータ・サンプリング方法の工夫などで改善を図っている。しかし、CTにおけるMDCTの登場のような革新的な改良は実現していない。現状では、3次元画像の元データを得る方法としては、空間分解能のより高いCTがMRIよりも優位

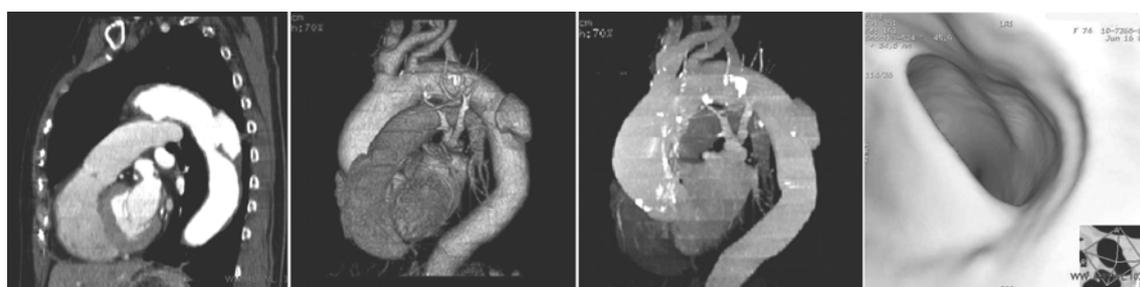
であるが、放射線被曝がない、組織コントラストがよく造影剤を用いずに血管内腔を描出することができる、などの利点が MRI にはあるので、CT, MRI いずれを用いるかは、症例・疾患・目的により異なる（表 3.1-1）。

表 3.1-1 CT と MRI の比較

	CT	MRI
空間分解能	◎	△
時間分解能	○	○
コントラスト分解能	×	◎
撮像範囲	◎	△
検査時間	◎	△
放射線被曝	△	◎

### 3.1.3 医療現場で用いられる 3 次元表示方法

実際に使われる 3 次元表示法としては図 3.1-1 に挙げるように、Reformation 法、Volume rendering 法、最大信号投影法（Maximum intensity projection、MIP 法）、管腔臓器の内面を内側から見たように表示する仮想内視鏡法（Virtual Endoscopy）などの方法が利用されている。閾値を用いて表示臓器の表面を確定してゆく Surface rendering 法もあるが、閾値の設定や操作者による表面の確定・修正など手間がかかることから、容積計測や濃度コントラストにあまり差のない臓器を表現するなど特殊な場合を除いて、あまり利用されなくなった。



a) Reformation    b) Volume rendering    c) MIP    d) Virtual endoscopy

図 3.1-1 3 次元表示方法（a-c: 胸部大動脈瘤、d: 大腸仮想内視鏡）

医療現場で 3 次元表示法を利用する場面としては、

- ① 画像診断（管腔臓器の描出、臓器と病変との関係の把握など）
- ② 治療支援（病変のマーキング、治療プランニング、ナビゲータ）
- ③ インフォームドコンセント：一般の方への理解しやすい説明に役立つ
- ④ 医学生教育・医療従事者への教育

などが挙げられるが、画像診断上、有用な利用法について次項に述べる。

### 3.1.4 画像診断における3次元画像の利用

診断において3次元画像が最も寄与する臓器は、横断面（撮像面）を連続的に走行する管腔構造、すなわち血管、尿管、消化管である。特に3次元画像は血管における有用性が高い。従来、血管の情報を得るためには、血管にカテーテルと呼ばれる細い管を挿入し、血管内腔に直接造影剤を入れて画像を得ていたが、動脈にカテーテルを入れる場合は止血に手間がかかるなど外来では行いにくい検査であった。近年では3次元画像表示の進歩に伴い、CTがこれに変わる検査法として積極的に利用されている<sup>1)</sup>。

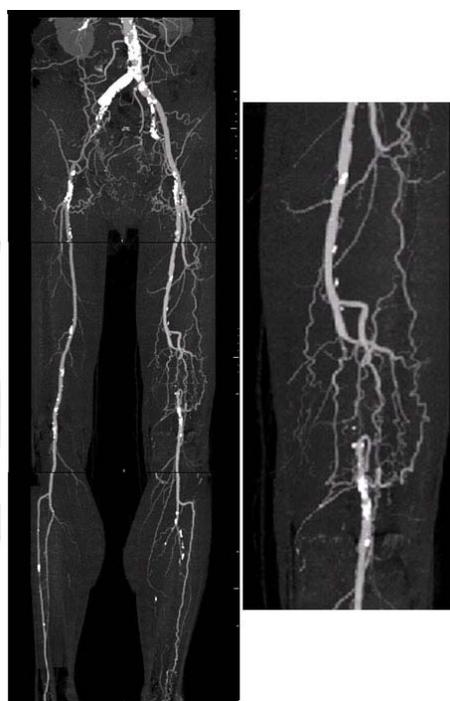
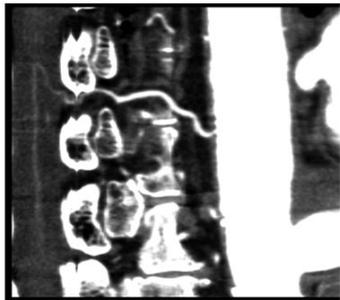
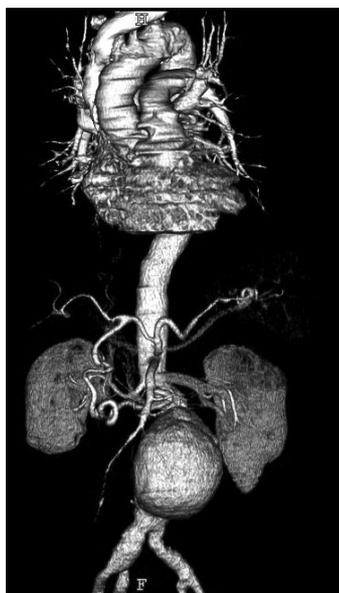


図 3.1-2 腹部大動脈瘤と前脊髄動脈の描出

図 3.1-3 下肢動脈、閉塞性動脈硬化症

例えば、図 3.1-2 では MDCT を用いて、胸部大動脈から両側総腸骨動脈に至る範囲を撮像し、腹部大動脈瘤の像を得ている。広範囲を撮像しているが、大動脈から分岐する前脊椎動脈と呼ばれる数 mm 径の細い動脈も描出されている。この動脈は脊髄の栄養を担うため、動脈瘤の手術の際にその存在部位を知ることが術前計画で重要な情報であり、広範囲の情報を得つつ詳細な血管も再現できるという長所は、臨床に利するところが大きい。図 3.1-3 は動脈閉塞症（ASO）の症例であるが、両側総腸骨動脈から下腿動脈まで撮像範囲に含んでいる。左膝窩動脈閉塞が観察され、その周囲には迂回路としての側副血行路が発達していることが明瞭に描出されている。

さらに、時間分解能が向上しているのです。従来は動きのため CT では画像化が難しかった心臓・冠動脈にも応用範囲が広がっている。図 3.1-4 に冠動脈像の一例を示す。従来はカテーテルによる冠動脈造影法が冠動脈形態診断のゴールドスタンダードであったが、MDCT では動脈の短軸横断像が得られるため、動脈プラークの形態がより詳細に評価できるようになり、血管造影法を超える情報を提供し得る。本法は虚血性心疾患の一診断法として普及が進んでおり、診断手順を変える可能性がある<sup>2)</sup>。



図 3.1-4 冠動脈（左：Volume Rendering 像、中央・右：Curved MIP 像）

MRI でも冠動脈像を撮像する試みが進んでいる。空間分解能は CT に及ばないが、被曝がなく造影剤を用いる必要がないことは MRI の大きな利点であり、今後の開発と臨床応用が期待されている。

その他、腎臓から造影剤が排泄されるタイミングで CT を撮像すれば、3次元の尿管像が得られる。空気で大腸を拡張させた後に CT を撮像し、これを内腔からの視点で画像を再構成すれば仮想内視鏡像が得られる。胸部 CT では、特別な処置をせずとも気管支の仮想内視鏡像を得ることができる。仮想内視鏡は管腔であれば応用可能であり、前述の他にも血管、膀胱、膵管への応用が報告されている<sup>3)</sup>。

これまで挙げたように 3D 画像を利用した画像診断は、特に血管の診断において従来の直接造影よりも侵襲性を低減し、より多い情報を医療現場にもたらしている。元画像を提供する MDCT や MRI は既に多数導入されているものの、3D 画像を積極的に利用している施設は多いとはいえない。その理由は、3D 画像制作には別途後処理が必要であるが、多忙を極める現場では 3D 画像作成に費やせる時間を十分とれないためである。3D 画像作成の半自動化やオペレータの負担を少なくするような操作アルゴリズムなど、3D 画像作成に取り組みやすい環境が整えば、3D 画像の利点を生かす機会は増える。医療現場でも 3D 画像作成ソフトウェアの開発・改良に大きな期待が寄せられている。

## 参考文献

- 1) 松本一宏、陣崎雅弘、佐藤浩三、他。脈管学 42(8)、505-510、2002
- 2) 陣崎雅弘、佐藤浩三、田波 穰、他。日獨医報 50(1)、161-169、2005
- 3) Nakagohri T, Jolesz FA, Okuda S et al. Comput Aided Surg. 3(5)、264-268、1998

## 3.2 3次元超音波画像

### 3.2.1 超音波診断装置の進歩

実時間で体内臓器の描出と動きの情報の計測を可能にした超音波断層画像装置は、重要な診断手段として普及している。近年、超音波診断装置はデジタル化が急速に進行し、その基盤の上に3次元表示も含め、種々の応用技術が進展している。

基本的には超音波診断装置は振動子(探触子)を用いて超音波パルスを生体中に送波し、反射してきた音波を用いるパルス反射法を基本としている。音波の強度は生体に対して安全な範囲で長時間検査を受けてもまったく問題ない。受波された信号は、生体中の音速が一定で、音波は直進して伝搬することを仮定し、断層画像を形成している。超音波画像は、リアルタイムに分解能の高い画像を安全に形成できるという大きな特徴のある反面、超音波特有のアーチファクトや診断のための読影に経験が必要なことなどの問題点も指摘されている。しかし、100dBを超えるダイナミックレンジと理論的な波長限界に近い分解能を実現するために、高度な技術が投入されており、生体のほんのわずかな音響特性の変化を敏感に描出する画像がリアルタイムに得られている。これらの最近の技術の進歩を支えているのが、診断装置の送受信も含めたフルデジタル化による高度な信号処理である。

図 3.2-1 に受波部分の従来の診断装置とデジタル診断装置の構成を示す。従来の超音波診断装置でも、画像情報や制御部分についてはもちろんデジタル化されていた。しかし、振動子アレーを構成する多数の素子の音響信号を完全にデジタル的に扱うことは、近年まで困難であった。医学応用ではダイナミックレンジが大きく、毎秒 30 フレーム程度の高解像度なリアルタイム画像が得られなければ臨床的価値はない。サンプリング周波数を 40MHz とし、アレー処理に必要なチャンネル数を 100 とすれば、 $40 \text{ MHz} \times 1.5 \text{ バイト} \times 100 \text{ チャンネル} \times 8 \text{ ビット} = 48 \text{ Gbps}$  が必要である。3次元処理ではさらに処理量は増える。これだけの処理を、市販の装置に実装するためには、A/D 変換器と高速デジタル信号処理回路、並列処理手法の進歩が不可欠だったが、半導体技術の進歩により診断装

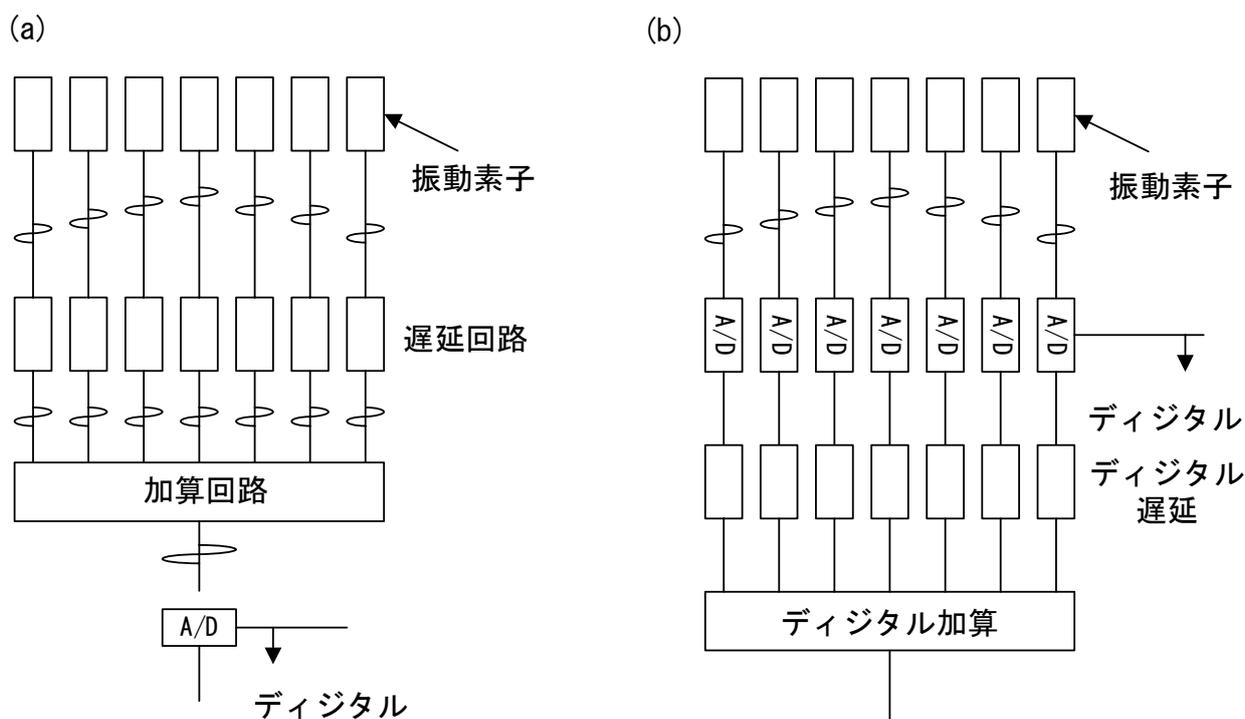


図 3.2-1 デジタル診断装置の構成

置の種々のデジタル処理が現実のものとなっている。

このデジタル化によって、受診ビームの高度な制御が可能になった。分解能を高めるためには、送受信でできるだけ細いビームを形成する必要がある。デジタル化により受波フォーカスの設定の遅延時間を正確にコントロールできる上に、深さ方向の各点に最適な遅延時間をメモリー上で設定することができ、画像ピクセル単位でのフォーカス制御による高精度な受波ビームを形成することができる。さらに、複数方向のビームを同時に形成することができるので、3次元画像の生成も高速に行えるようになってきた。

送信においても、振動子の特性を考慮した電気信号波形をデジタル的に生成し与えることで、最適な音響信号波形を送波することが可能である。さらに、デジタルコード化された音響信号を送波すれば、相関演算により処理利得を得ることができ、減衰が大きな高い周波数の音波を利用することができ、高分解能な画像が得られる。このようなデジタル化による技術を支えるのが振動子の進歩である。短いパルスやコード化された信号を送受波するのに、広帯域振動子が不可欠であるが、このような広帯域化は、振動子材料の開発と最新の設計技術によって実現されるもので、地味ではあるが極めて重要である。

### 3.2.2 超音波診断における 3 次元画像

3次元超音波画像は、(1) 複雑な解剖学的特徴の可視化、(2) カテーテルや穿刺の空間位置の把握、(3) 腫瘍などの表面形状による良悪性判定、(4) 検査時間の短縮、(5) 患者への説明が容易、(6) 手術計画の立案などに有効である。

コンピュータを用いて、今日のような超音波 3 次元像 (図 3.2-2) が初めて得られたのは、1986 年の胎児 3 次元像である。3 次元像は、胎児と周囲の羊水との輝度の差を利用して胎児部分だけを抽出 (領域抽出) してから画像構築が行われていたが、その後、ボリュームレンダリングにより、胎児内部を半透明に透かして表示することや、反射の強い骨格の 3 次元像を表示することができるようになった。どちらにしても、胎児は周囲の羊水との反射波強度の差が大きいので、他の臓器に比べ 3 次元化が容易であった。



図 3.2-2 胎児の超音波断層画像 (左) と 3 次元像 (右)

胎児の 3 次元像は表情や動きなどをとらえることができ、大変インパクトのある画像ではあるが、診断という意味では、断層画面は不可欠である。3 次元超音波は、3 次元像を作るだけでなく、ボリュームデータから任意断面構築が高速に行えることが重要である。任意断面表示では、互いに直交する 3 つの断面を同時に表示する直交 3 断面表示が多用される (図 3.2-3)。超音波ではドプラ法を用いて血流の情報もリアルタイムに得ることができるが、音波の反射強度を示す 2 次元の断層画像に、3 次元ドプラ情報を重畳すると立体的な構造のある血流でも欠落なく表示できる。図 3.2-4 はへその緒の血流を胎児像に重ねたものである。超音波画像は任意の断面をリアルタイムで得ることができるが、CT や MRI 画像との対比が難しい場合がある。最近、超音波断層面に相当する断層像を、CT ボリュームデータから描出するシステム (Real-time Virtual Sonography) (図 3.2-5) が登場し<sup>5)</sup>、このような異なる手法の融合の方向も進展すると考えられる。

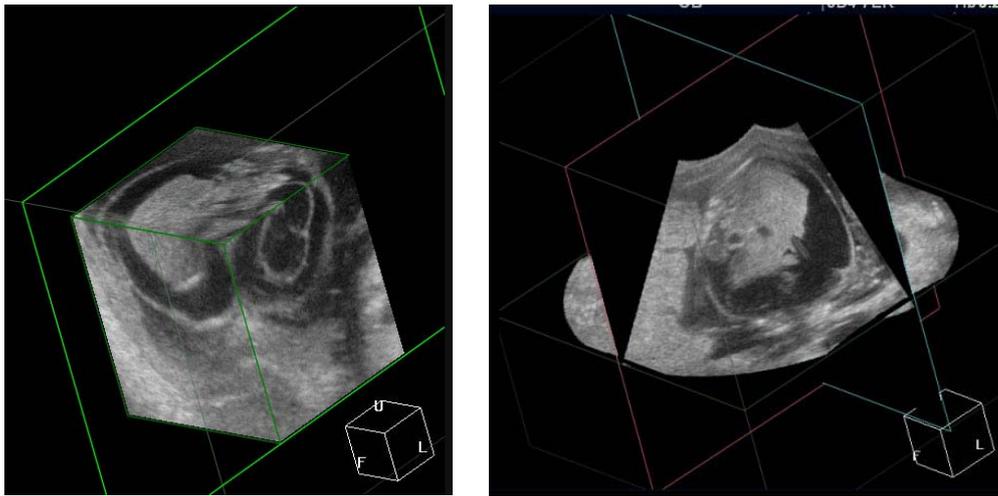
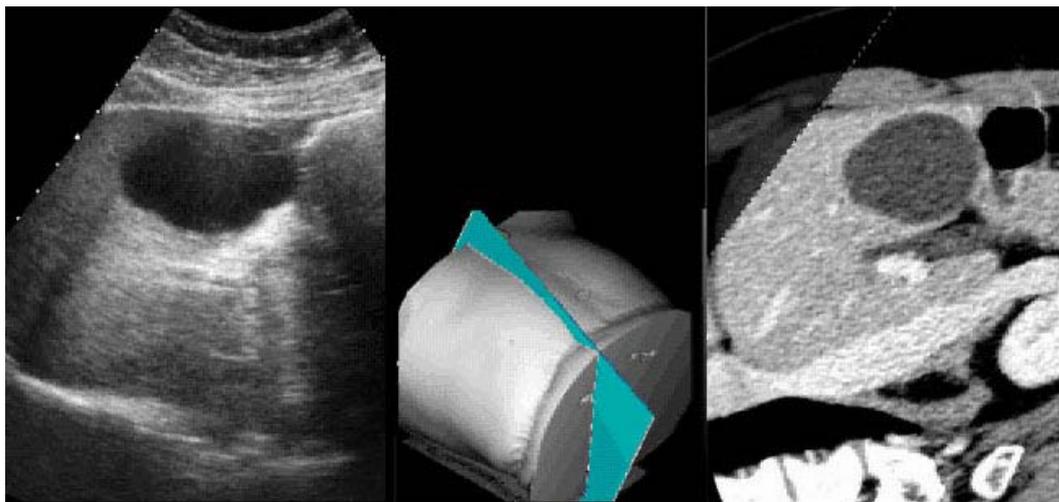


図 3.2-3 超音波 3 次元データの表示方法



図 3.2-4 へその緒の血流の 3 次元構築。赤が画面上方に向かう血流，青が画面下方に向かう血流を示す。  
一番下の波形は血流速度の時間変化を示している。



3.2-5 Real-time Virtual Sonography : 超音波断層画像 (左) にあわせて、CT ボリュームデータから同一の断面 (右) がリアルタイムに生成され比較可能となる

## 参考文献

- 1) Woo J : A short history of the development of ultrasound in obstetrics and gynecology. <http://www.ob-ultrasound.net/history3.html>
- 2) 馬場一憲 : 産婦人科領域における 3 次元超音波技術の進歩、日超医 78 回講演抄録集
- 3) 竹内久彌・馬場一憲・編集、マスター3次元超音波、メジカルビュー社
- 4) 伊東紘一編集、超音波医学最前線、医歯薬出版
- 5) MEDIX、Vol.40、日立メディコ (2004)

### 3.3 3次元内視鏡

内視鏡外科手術は1990年に本邦に導入され、その低侵襲性から消化器外科のみならず、呼吸器外科、泌尿器科、産婦人科、整形外科などの分野に広がり、さらには心臓外科、脳神経外科などへの適用も見られるようになってきている。

一般的に、内視鏡外科手術は従来の開腹手術に対して体に加える切開が小さく、それによって手術後の痛みも少なく、入院期間も短い、と言われている。これら患者にとってのメリットがある一方、内視鏡で得られる視野の広さや、組織を処置する鉗子（処置具）の操作性に制約があること、観察する映像が2次元であるために奥行き感覚が得難いこと、といった条件下での手術が術者に対するストレスとなっている<sup>1~2)</sup>。

3次元内視鏡は、2次元映像での奥行き感覚の得難さを解消し、術者が観察対象を立体的に把握できうるものとして以前から期待され、両眼視差を利用した方式を中心に開発が進められてきた。本項では、最近の3次元内視鏡開発事例について述べる。

#### 3.3.1 3次元内視鏡開発事例

##### (1) 高精細 3D 観察システム (オリンパスメディカルシステムズ)

従来の3次元内視鏡で指摘されていた術者の眼精疲労の低減に向け、画像の歪が少ない内視鏡と高精細な小型ディスプレイを搭載した表示装置の組合せによるシステムが、オリンパスメディカルシステムズと金沢大学医学部附属病院心肺・総合外科とで共同開発されている (図 3.3-1)。

3D内視鏡は、後述の(2)と同様3次元観察のための2つの光学系と、2次元観察のための1つの光学系の合計3つの光学系が備えられている (図 3.3-2)。3次元観察は奥行き感が必要とされる微細な処置に適するため、3次元光学系は歪の少ない光学設計が、2次

元光学系は術部と鉗子の位置関係が把握可能なように広角観察を目的とした光学設計が採用されている。

3D 表示装置は、高精細小型ディスプレイ（SXGA6 インチ液晶）が 2 つ内蔵され、左右の目でそれぞれのディスプレイを別々に見るために、眼精疲労の原因とされるクロストークが発生しないものである。歪の少ない 3D 内視鏡との組合せで、左右差の少ない自然に近い 3 次元観察が可能となっている。また、2 次元光学系で捉えた画像は、3 次元画像にスーパーインポーズして表示することも可能なことから、広角の 2 次元観察と 3 次元観察を同時に行うことができる。



図 3.3-1 高精細 3D 観察システム

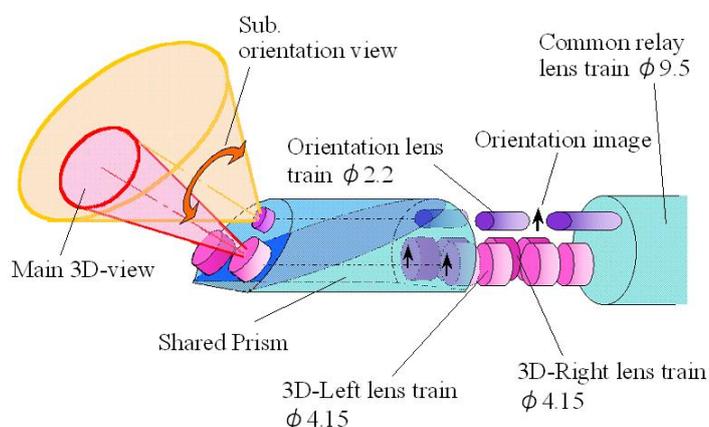


図 3.3-2 3D 内視鏡構成

## (2) 3D/2D 映像システム (オリンパス) 2)

ロボット内視鏡手術システム da Vinci Surgical System (Intuitive Surgical 社) 向けに開発された 3 次元内視鏡である。

従来の da Vinci Surgical System の 3 次元画像システムでは、3 次元観察のみに対応した光学系であるため、術野全体の観察は内視鏡を後退させて視野範囲を広げる調節を行っていた。3D/2D 映像システムでは、微細な処置に適した 3 次元観察のための 2 つの光学系に加え、術部と鉗子の位置関係把握に有効な広角観察を行う 2 次元光学系が備えられている。da Vinci Surgical System のコンソール側のモニタに 3D/2D の画像を切替えて表示することで、視野を確保するための内視鏡進退動作を不要としてスムーズな手術が可能となっている (図 3.3-3)。

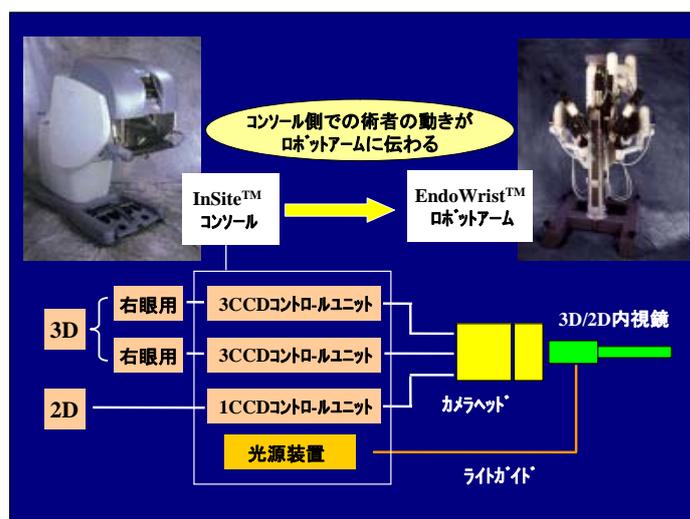


図 3.3-3 3D/2D 映像システム構成

(3) 立体内視鏡（新興光器製作所）<sup>3)</sup>

先端部に CCD が配置されている 3 次元内視鏡が新興光器製作所にて開発、製品化されている。1/10 インチの CCD が内視鏡先端部に 2 つ配置されているため、リレーレンズを用いている方式に見られる画質劣化がないものである。

表示装置には高速応答液晶モニタを用い、時分割方式で表示された映像を、偏光メガネを着用して観察することにより 3 次元観察を行うものである。

難度の高い手術症例での長時間に渡る手術においても、ほとんど疲れの問題は発生していないようである。

(4) 海外動向

海外では、数多くのメーカーによる 3 次元内視鏡の開発が行われてきた。現在でも数は少ないが 3 次元内視鏡を製品化しているメーカーが存在する。以下代表的なものを紹介する。

(a) EndoSite 3Di Digital Vision System (Viking Systems) <sup>4)</sup>

表示装置にヘッドマウントディスプレイ (HMD) が採用されている。HMD の解像度は SVGA で、右目用と左目用の画像を撮像するために、カメラが 2 つ備えられている。

(b) 3D Endoscopy System (Karl Storz) <sup>5)</sup>

内視鏡は単一の光学系であり、左右 2 つの光学系によって構成される 3 次元内視鏡が抱える左右差の問題を抑制している。表示装置は単一のモニタに表示された映像を、偏光メガネを装着して観察する方式である。

### 3.3.2 課題と展望

3次元内視鏡の課題としては、内視鏡外径の細さによる立体感の制約や、固定視差からくる3次元観察範囲逸脱時の2重像観察という内視鏡側のものと、メガネなし方式での3次元観察可能な範囲の制約や、メガネやHMDを装着する方式での拘束感や画質低下という表示装置側のものがある。

また、内視鏡に限ったことではないが、両眼視差方式の問題点として、観察者の輻輳と調節に矛盾が生じるということがある。この矛盾の程度が大であることが、観察者に対する生理的影響の原因であることも明らかにされている<sup>6)</sup>。

以上の課題はどれひとつとして解決容易なものはないが、これらを克服して、3次元観察をより自然なものに近づける取り組みが、3次元内視鏡の普及につながってゆくものと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 篠原他：立体視による内視鏡外科手術，消化器内視鏡，14(3)，pp.355-360(2002)
- 2) 谷沢：手術支援用ロボット　ダ・ビンチ・サージカルシステム向け「3D/2D映像システム」の開発，ロボット，157，pp.10-12(2004)
- 3) 福与：3次元腹腔鏡の開発（硬性内視鏡），医科器械学，75(11)，pp.749-753(2005)
- 4) <http://www.vikingsystems.com/>
- 5) <http://www.karlstorz.com/>
- 6) 江本他：立体画像観視における両眼の輻湊と焦点調節の不一致と視覚疲労の関係，映像情報メディア学会誌，56(3)，pp.447-454(2002)

## 3.4 3次元画像による手術計画と手術ナビゲーション

### 3.4.1 治療における3次元画像　－手術ナビゲーション－

本節では、3次元画像・立体表示の医療応用事例として、画像情報に基づいた外科的治療、特に拡張現実感による3次元表現の研究開発の事例について報告する。

現在、医用3次元画像はX線CT、MRIの画像取得技術発達および計算機の処理能力の向上に伴い、急速に発達してきている。3次元画像の持つ空間位置情報によって、体内の臓器や患部の空間的な位置情報を正確に捉えることが可能となり、手術計画技術だけでなく、手術中において患部の位置を正確に把握する手術ナビゲーション技術が普及しはじめ

ている。手術ナビゲーションは、術者の持つ手術器具等の位置・姿勢を 3 次元位置計測装置等により測定し、患者（患部）に対する器具の位置を座標変換によりリアルタイムに算出して、医用画像中に器具の位置を表示するシステムであり、既に製品化されているこの分野の成功例であるといえる。

手術ナビゲーションの 3 次元表示の手法は、図 3.4-1 のような XYZ 軸を基準とした断層面の三面表示および MIP 等の画像処理を施した 3 次元 CG を利用しており、立体的な把握を行なうものが多い。しかしながら、ナビゲーション装置は製品化されているとはいえ、その 3 次元的な情報の提示手法に起因する問題点があり、使用者である術者はトレーニングや経験を積み重ねることが必要である。ここでその問題点を下記に列挙する。

- ・ 術者がナビゲーション画面を参照する際に、しばしば作業域・患者から目を離す必要性がある。
- ・ 術者の姿勢とナビゲーション情報の示す座標系の対応が術者の経験・技量に依存する。また術者は 3 次元的な情報を思考により再構成しなければならない。そのため、位置決め作業を行う際に手間取り時間がかかる。
- ・ 情報が 2 次元的にしか得られないため、特に奥行き方向に関して正確な位置把握を行うことができない。

これらの問題は結果として集中力の低下・手振れの発生などを引き起こし、正確な作業の妨げになる。すなわち、手術計画に基づくナビゲーションの情報を有意に生かせず定量的なデータとして維持できていないことを意味する。この根本的な解決方法として術者の作業位置と情報の融合を図るための、「拡張現実感（Augmented Reality）」技術が注目を浴びてきている<sup>1)</sup>。

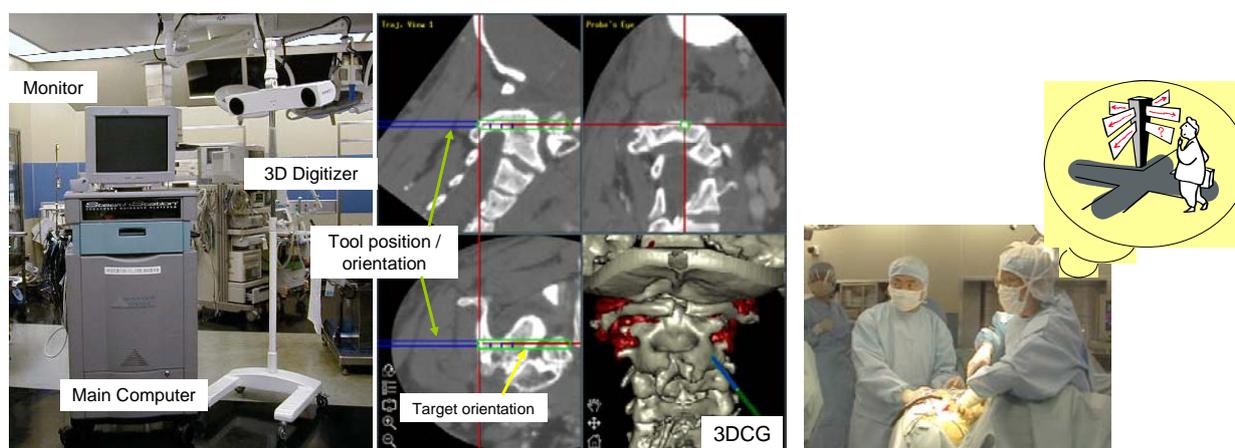


図 3.4-1 手術ナビゲーション装置の例  
装置概観（左）、ナビゲーション画面の例（中）、  
手術ナビゲーション画面を観察しながらの作業を強いられる術者（右）

拡張現実感をナビゲーションシステムに応用する研究は多数行われているが、特に医療分野を狙った場合、3次元表示方法には下記の条件等を考慮する必要がある。

- (1) 奥行き、視差が厳密であり、空間上の距離や位置関係が正確であること
- (2) 特殊な眼鏡等の専用器具の装着が不要であること
- (3) 視覚疲労のない実空間3次元画像であること
- (4) 高画質であり、カラー表示が可能であること
- (5) 手術室内で使用できるような簡易な装置が製作可能であること

本報告では、これらの条件を踏まえた最近の動向、システムの紹介および問題点、今後の展開について述べる。

### 3.4.2 画像撮影装置一体型ハーフミラー式重畳表示システム

拡張現実感の医療応用の中でも、特に手術中に画像を獲得し表示するシステムの開発が注目されてきている。手術中に画像を撮影することで、術中の臓器変形や位置のずれなどを補正することができる。例えば、脳神経外科領域では術中の脳変形による目標位置の精度低下が早くから問題となっていたが、手術中に画像を得ることで変形に追従することが可能となり、精度向上だけでなく、治療中により豊富な情報を得ながら手術することが可能となってきた<sup>2)</sup>。

手術中に得られる画像撮像装置は装置の大きさと手術室の広さ等により制限があるが、最近では、超音波断層画像装置、X線用Cアーム、モバイルCT、そしてオープンMRIなどが導入されている。また最近では南部らにより手術室内での撮影に特化したDVT (Digital Volume Tomography) 撮影装置なども開発されている<sup>3)</sup>。これらの動きは、従来診断用として使われてきた画像取得装置が手術室に積極的に導入され、治療に不可欠なデバイスとして導入されつつあることを示している。

拡張現実感の手法は数種類に分けられるが、ハーフミラーを用いた重畳表示法は一般にも用いられる手法ではあるが、特に治療用途としては前述の(1)～(5)の条件をすべて満たすため、実用度が高い。ここでは各画像モダリティを用いた例を挙げる。

超音波診断画像による拡張現実感の導入をいち早く行ったのはH. Fuchsらであるが、システムが複雑であり、2眼式立体視による重畳表示法の疲労や奥行き認識の問題点があった<sup>4)</sup>。そこで、断層画像装置にハーフミラーとモニタを直結したシステムがG. Sttetenにより開発された<sup>5)</sup>。超音波断層画像装置はリアルタイム性があり、Mammographyの生検や肝臓腫瘍穿刺といった柔軟臓器への治療に向いていると考えられる。

X線 CT 装置による拡張現実感を正宗らが開発している<sup>6)</sup>。図 3.4-2 にシステム構成図、実施例を示す。X線 CT の撮像断面の平面上とモニタの画像情報の鏡像平面を一致させることで、幾何学的に実像および断層画像が重畳される。これにより、術者は位置・視線方向に関係なく撮影物体内部の映像を自然視により観察可能で、複数人による同時観察が可能である。CT 画像を用いた簡便な穿刺治療等に用いられ、現在臨床応用へむけた改良が行われている。

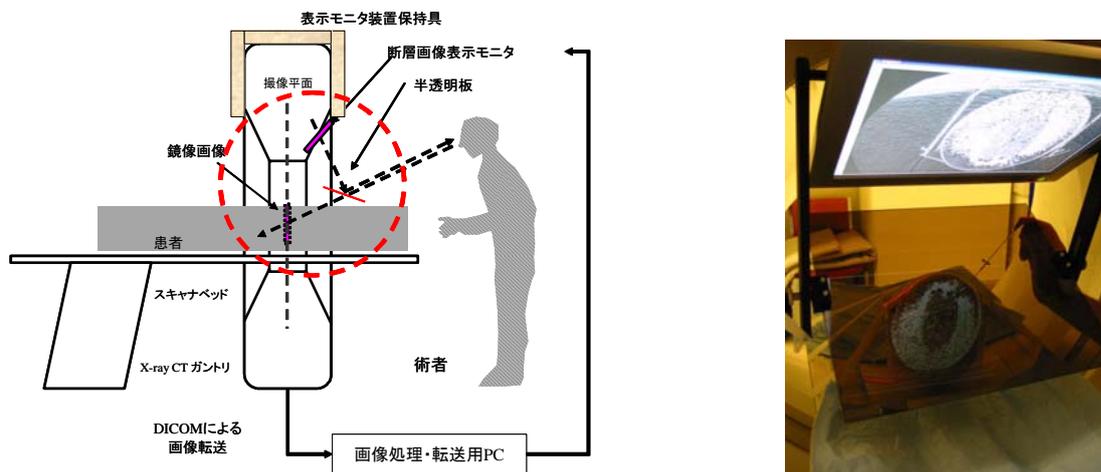


図 3.4-2 システム構成図及び実施例

X線 CT オーバーレイ装置のシステム構成（左）、オーバーレイ装置による穿刺実験（右）

MRI 装置と直結した拡張現実感によるナビゲーション装置は研究初期段階である。MRI は常に 0.2～数 T (Tesla) の強磁場環境であり、通常の電子機器類はその強磁場に影響を受けると同時に MRI 画像に影響を及ぼすため、材料・手法等が課題となる。村垣らによる MRI の磁場が十分に弱まる 5 ガウスライン外での AR ナビゲーションシステムや、正宗らによる MRI ガントリ内用画像観察デバイスの開発<sup>7)</sup>などが行われており、世界的にもいち早く研究が行なわれている。

### 3.4.3 ハーフミラーによる重畳表示システムの問題点および動向

ナビゲーションの問題点を克服するための拡張現実感システムとして、ハーフミラー等による拡張現実感システムを紹介した。原理的には幾何学的に一致しているため、キャリブレーション精度がよければ精確な重畳表示が得られるはずだが、装置の位置計測精度、ミラーの屈折率による誤差のみならず、使用者の 3次元認知力にも大きく影響することが明らかとなっている。例として松家らにより開発されたフレームレス断層画像重畳表示装置の例を挙げる。

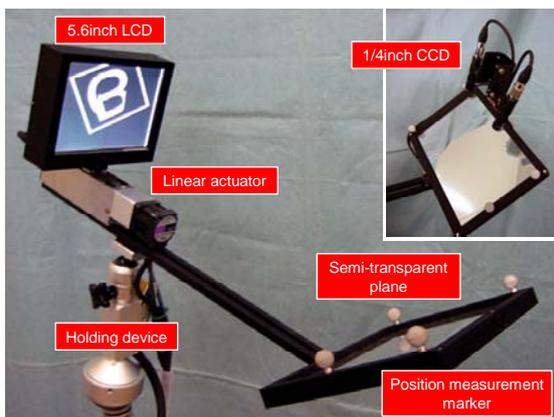


図 3.4-3 フレームレス重畳表示装置概観

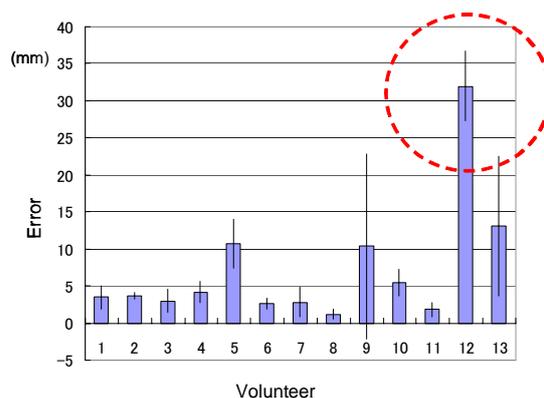


図 3.4-4 奥行き認知能力の個人差

図 3.4-3 に装置概観を示す。この装置は、術前・術中に取得した 3 次元ボリュームデータと実像を重ね合わせるシステムである。3 次元位置計測装置により装置および患者との相対位置を計測し、その位置に応じた断層画像を描出し重畳表示するシステムである。

本装置の精度評価の結果、位置計測誤差を含めたナビゲーション誤差が  $1.96 \pm 1.28$  [mm] であるのに対し、被験者による指示誤差は  $6.81 \pm 2.71$  [mm] と大きな誤差となった。図 3.4-4 に個人別データを示す。この図から読み取れることは、大抵の被験者は 3mm 以内の誤差で重畳画像上の点を知覚する一方で、一部の被験者は 30mm 以上の誤認識をしていたということである。すなわち、本手法のような 3 次元的な表示システムを用いて理論的に正しい重畳画像を提示できたとしても、使用者にとっては正確な位置を認識していない可能性があることを示唆している。

この実験結果報告により、特に医療の現場で拡張現実感を用いる際は、その誤差が致命的な処置を実行する可能性もあることから、特に注意すべき点である。

### 3.4.4 今後の展望、結語

ナビゲーション手術は高精度・低侵襲の治療を実現するためには不可欠な道具であり、その市場も拡大しつつある。しかし、本報告で述べたように、3 次元画像を扱うナビゲーションを特に高い精度を要求する治療に用いる場合は注意が必要である。そこで、個人差を無くすためのトレーニングシステムや知覚補助ツールの開発が行われ始めている<sup>9)</sup>。これらの補助的なツールにより、誤差の小さいより安全かつ定量性のあるナビゲーション治療が可能となると考えられ、それらはナビゲーション装置のさらなる普及のための重要なキーとなるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 山内康司：医療分野における立体映像の利用、平成 16 年度立体映像表示に関する調査研究報告書、日本機械工業連合会・日本オプトメカトロニクス協会編、pp.86-91, 2004
- 2) 村垣善浩：情報誘導による脳神経外科手術、第 14 回日本コンピュータ外科学会論文集, 05(JS)-7, 2005
- 3) K. Nambu, et al. : Digital volume tomography: a new three-dimensional imaging apparatus designed for intraoperative examination, Proc of CARS2003, Springer. p.1295, 2003
- 4) M. Rosenthal, H. Fuchs, et al.: Augmented reality guidance for needle biopsies: An initial randomized, controlled trial in phantoms, Medical Image Analysis , Volume 6, Issue 3 , pp. 313-320, 2002
- 5) Stetten GD, et al.: Overlaying ultrasonographic images on direct vision. J Ultrasound Med ;20(3):235–240, 2001
- 6) K Masamune et al. : An image overlay system with enhanced reality for percutaneous therapy performed inside CT scanner, Proceedings of MICCAI, Lecture Notes in Computer Science, 2489. Berlin: Springer, pp 77–84 , 2002
- 7) 正宗賢、他：イメージガイドによる MRI 対応非金属断層画像オーバーレイ表示装置、第 14 回日本コンピュータ外科学会論文集, pp.165-166, 2005
- 8) 松家大介、他：医用断層画像オーバーレイ表示システムの精度評価に関する研究、第 13 回日本コンピュータ外科学会論文集、pp.251-252,2004
- 9) K Masamune, et al.: Skill index for operating Spine Surgery Robot and Image Overlay system toward HAM based surgery system, Proc.2nd COE Workshop on Human Adaptive Mechatronics,Saitama,pp.71-76,2005

## 3.5 ハイビジョン立体視ビデオ顕微鏡手術システム

### 3.5.1 はじめに

医療における顕微鏡を用いた外科手術は 20 世紀後半に発展し、脳外科、眼科、整形外科、耳鼻咽喉科など各科領域において必修の治療手段となった。

手術顕微鏡の構造は 2 組のレンズ系で立体視ができるようになっている、いわば小さいものを大きく見る一種の双眼鏡である。開発当初は、主術者が覗いて手術ができれば良い

単純な構造であったが、追加機能として、副術者あるいは助手用の側視鏡（立体視できず大きく重い）、や手術内容を記録するためのテレビカメラ用などの側視鏡筒（小さく軽い）が付加され、重量が増し、全体の形が大きくなってアンバランスを生じ、大変扱いにくいものになってしまった。そのため、操作が面倒になり、見たいところに顕微鏡をもって行けなかったり、アシスタントが怪我をしたりするので、解決要望が寄せられている。しかし、このような要望があるにもかかわらず、既存の大きなメーカーでは工業用光学器械も含めた変更、改善が困難で放置されてきた。

本稿は、こうした状況を解決するために、NHK が世界に先がけて開発したハイビジョン技術を使っての立体視システムを採用して、軽くて高操作性のビデオ顕微鏡を開発した。

### 3.5.2 現行手術用顕微鏡の問題点（図 3.5-1）

これまでの脳神経外科手術用の顕微鏡は主術者と、副術者と手術内容を記録するモニターテレビカメラを組み合わせることが一般化している。しかし、副術者用の重い大きな側視鏡があるため以下のような問題点が指摘されている。



図 3.5-1 手術用顕微鏡

- 顕微鏡が重くなり片手で顕微鏡操作ができない。
- 側視鏡が邪魔をして手術し易い術野を確保出来ない。
- 手術ポジションによって顕微鏡を大きく傾けるたびに、副術者が使用するアシスタント顕微鏡の方向が変わり、顕微鏡全体がアンバランスになる。主術者は、そのたびアンバランスを調整するため、手術時間がかかる。
- アシスタント側視鏡は、立体視でないため、実体験をすることが出来ない。
- 主術者は、絶えず副術者が怪我をしないよう気を使わねばならない。
- 記録用の映像が立体視でないため名医の手術テクニックを若手医師に伝わらない。

今回、こうした状況を解決するために、ハイビジョン技術による立体視を使い、主術者の顕微鏡と副術者あるいは助手の見る側視鏡（アシスタント鏡）を本体顕微鏡から分離して、バランスのとれた小型・軽量で使いがっのの良い、高機能ビデオ顕微鏡を試作した。

### 3.5.3 ビデオ顕微鏡の構造

従来の手術用顕微鏡と違って、ビデオ顕微鏡には光学接眼レンズがない。代わりにハイビジョンカメラで顕微鏡像を立体撮影し、その映像をリアルタイムで小型液晶ディスプレイに表示して、これを術者が立体視しながら手術を行う。

今回試作したビデオ顕微鏡（図 3.5-2、図 3.5-3）は、可動鏡を使った立体撮影光学系と大口径のズームレンズを組み合わせた光学系で 550～800mm 離れた場所にある被写体を捉え、その像を高精細ハイビジョンカメラで撮影する。ズーミングは、距離が 800mm の場合で視野直径 12～72mm である。口径 62mm（F 値 2.3）の明るいズームレンズを使用しており、従来の顕微鏡と同等の明るさの像を約 10 分の 1 の照明照度で得られる。

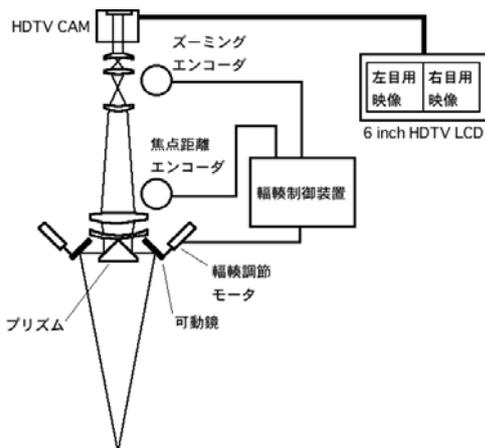


図 3.5-2 ビデオ顕微鏡の構造



図 3.5-3 試作したビデオ顕微鏡（右）

#### (1) ビデオ顕微鏡の立体撮影の仕組み

このビデオ顕微鏡は単カメラ・単一光学系方式であり、すなわちカメラとレンズが一系統しかない。レンズの先に取り付けた立体撮影光学系が、左右一対の映像をハイビジョンカメラの縦・横アスペクト比 9 対 16 の CCD の左右半分ずつの領域に投影する。レンズのズーミング調節および焦点調節に応じて、モータードライブで可動鏡の角度を変えて輻輳角の調節をおこなう（図 3.5-2）。

## (2) 立体像の観察の方式

このビデオ顕微鏡は、カメラからの映像を直接 6 インチ液晶ハイビジョンディスプレイに表示する。術者はこの映像を、ディスプレイに取り付けた立体視ビューア光学系を介して観察する。立体視ビューア光学系はプリズムを使って、ディスプレイ上の左の映像は左目に、右の映像は右目に入るように像の見かけの位置を変化させる。同時に凸レンズで、目の近くにあるディスプレイに焦点が合うように調節する（図 3.5-4）。

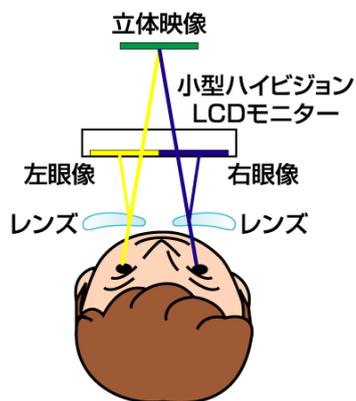


図 3.5-4 立体視の原理



図 3.5-5 ロボット手術に応用

この立体視方式（ステレオグラム）は、従来医療用立体視装置に用いられている偏向シャッター方式や偏向メガネ方式のような減光、ちらつきなどが無い。さらに、本立体視ビューア光学系は見る人の明視距離に合わせて調節できるので、自然な立体視ができ、長時間見ても疲れにくい（図 3.5-5）。

### 3.5.4 ビデオ顕微鏡の手術用顕微鏡としての特長

#### (1) 何人でも同時に主術者と同じ立体視映像を見ることができる

立体視映像信号を副術者、助手用に分配すれば立体視できるようになり、より効率的に短時間に正確な手術が行え、患者に負担の少ないチームサージャリーが可能になる。また、医局、院外にも伝送でき名医に相談することも可能になる（ドクターオンデマンド）。記録した映像も、若手医師の教育等に利用できる。

#### (2) 手術作業空間を大きく取ることができる

手術者の接眼鏡に関係なく動作距離を大きくすることができ、術者が見やすい場所にディスプレイを設置したまま、術野から数十センチ上方にビデオ顕微鏡（の対物レンズ）を設置することができ手術の作業空間を広くでき、出血時の対応などが容易となる。

(3) 主術者、副術者が顕微鏡の動きに左右されず姿勢が楽になる

従来の顕微鏡では、術者は接眼レンズの光軸上に左右の目の瞳孔を常に正確に（7mm程度以内の精度で）合わせておかねばならない。このため顕微鏡を動かせば、術者はそれに合わせて姿勢を変える必要があった。ビデオ顕微鏡では、顕微鏡光学系と術者の見るディスプレイとが光学的に独立しているため、両者は別々のスタンドに取り付けてある。このため、術者の姿勢は顕微鏡の位置に拘束されることはなく、術者の最適な姿勢を保ったまま手術ができる。さらに助手用として、立体視ビューア付きディスプレイをもう一台追加すると、術者と助手が対向して術野を観察しながら4本の手を入れて手術できる（図 3.5-6）。

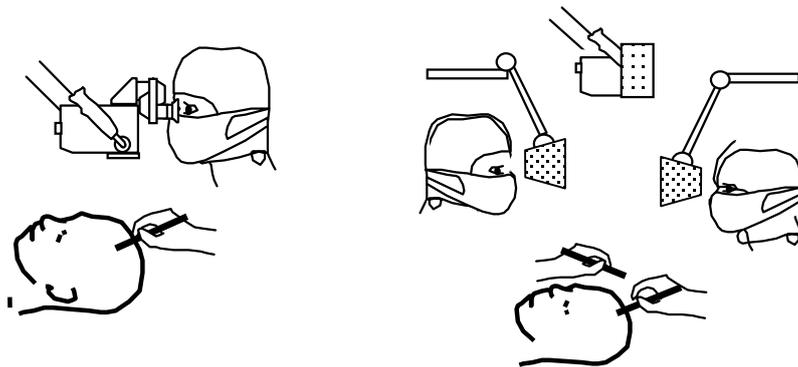


図 3.5-6 従来の顕微鏡は接眼鏡の位置に合わせて目を固定しておく必要がある（左）。ビデオ顕微鏡では術者の姿勢が拘束されず、術野の上方を広く開けられ、術者と助手が同じ立体映像を見て同時に手術操作を行える。（右）

(4) 立体視ビューア光学接眼鏡より見易い

立体視ビューアの接眼レンズは大口径であり、瞳孔の位置が 2~3cm ずれても問題なく立体視できる。

(5) ビデオ信号に他の映像を合成できる

映像信号であるため、画面の隅に MRI などの画像を表示でき、手術誘導用のコンピュータグラフィックスを術野映像にスーパーインポーズする augmented reality 表示も可能である。この機能によって、術者は頭を動かして MRI、CT のレントゲン映像を見なくとも、術野映像のモニターから目を離すことなく、手術支援情報を参照できる。

(6) がん細胞のみを摘出する蛍光観察・手術が可能になる

ビデオ顕微鏡は大口径のズームレンズを使っているため腫瘍などの微弱な蛍光でも見える。手術では、組織で反射・散乱した励起光を除去するために波長選択フィルターを通して腫瘍からの蛍光と周りの組織を観察出来るようにして、腫瘍を残すことなく摘出する。

### 3.5.5 市場規模および事業性

#### (1) 国内市場

矢野経済研究所「治療機器編 2005 年版機能別 ME 機器市場の中期予測とメーカーシェア」によると国内の手術顕微鏡の環境は以下のようになっている（表 3.5-1）。

表 3.5-1 手術顕微鏡の市場と購入環境

分野	ターゲット施設数	購入環境
脳外科	1,800(専門医訓練施設 1,200)	施設基準、国立病院の独立行政法人化等により手術顕微鏡予算化の縮小と厳しい市場環境であったが、2004～2005 年度は買い替え需要で市場拡大
眼科	3,000	白内障手術等の症例数は増加しているが、新規施設数は少ない、また 1 施設当たりの設備投資効率悪化により、買い替え需要を含めて厳しい市場環境
耳鼻咽喉科	3,800	一般診療所など処置用/小型タイプは安定推移も、手術用に関しては大きな伸びが見られず

本ビデオ顕微鏡の特徴は、主に脳神経外科のように頻繁に顕微鏡の位置を動かして手術を行うのに適している。ここ数年間脳神経外科用顕微鏡の年間入替数はだいたい 180 台と一定である。(矢野経済研究所) 本顕微鏡の特徴が認識され浸透すれば、現行施設がすべて入れ替わる可能性がある。製品化を行い、学会などで使用実績を報告、展示等を行い事業化を進めていく。

眼科、耳鼻咽喉科は手術中顕微鏡をほとんど動かさないのも、本ビデオ顕微鏡の特徴は活かされないけれども、名医の手術が立体で見えるので、収録されたビデオが研修医の教育に大いに役立つと思われる。某眼科機器メーカーから研修用施設に入れる引き合いがきている。

#### (2) 海外市場

日本の約 10 倍が海外の顕微鏡の市場規模であるから、大きな市場として捕らえることができる。しかし、販売方法、維持・保守体制など緻密な計画が必要になることを留意していかなければならない。眼科については、すでに、アメリカから眼科手術医の研修に使いたいとの問い合わせがきている。

## 3.6 不安や恐怖の治療用バーチャルリアリティ – VRエクスポージャー

### 3.6.1 VRエクスポージャーとは

エクスポージャーは、認知行動療法の主要な治療技法の1つであり、不安などが低減されるまで患者を恐怖刺激に暴露するものである。現実の刺激を用いる *in vivo* エクスポージャーと、想像させた刺激を用いるイメージエクスポージャーという従来の方法に加え、近年、バーチャルリアリティ (VR) 空間で刺激を呈示する VR エクスポージャーが行われるようになってきた。VR エクスポージャーでは、一般に、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) という頭部搭載型の映像呈示装置が使用されている。HMD は、視野を覆うと同時に、体験者の動きに応じたインタラクティブな 3次元映像表現が可能なことから、狭い場所でも高い臨場感を呈示できる。そのため、VR エクスポージャーの特徴として、以下の6点があげられる。

- ・エクスポージャーを診療室内で行えること
- ・恐怖の強い患者に対し、エクスポージャーの安全性を強調できること
- ・恐怖を惹起するさまざまな環境を同時に提供できること
- ・*in vivo* エクスポージャーの前段階の治療として位置づけられること
- ・*in vivo* エクスポージャーで脱落した患者を対象に治療できること
- ・経済的／時間的節約となること

先行研究のレビューにおいて、VR エクスポージャーは高所恐怖や飛行恐怖といった、特定の恐怖症を中心とした不安障害の治療に有効であり、*in vivo* による刺激呈示が困難な場合に、その代用として有効であることが指摘されている<sup>1)</sup>。本稿では、医療分野における3次元情報のインタラクティブな利用としてVRエクスポージャーに着目し、その国内外の動向について筆者らの取り組みを交えて紹介する。

### 3.6.2 海外での取り組み

VR エクスポージャーの研究報告としては、1990年代の半ばから散見され、中でもVRの専門家であるHodgesと臨床心理学の専門家であるRothbaumらの学際的なチームによる、高所恐怖症の治療をはじめとした先駆的な取り組みが多い<sup>2)</sup>。米国では、Hodges、Rothbaumらとの連携により、エクスポージャー向けのVR開発を専門とする企業、Virtually Better<sup>3)</sup>が1996年に設立されている。同社では、不安や恐怖を治療するための、

さまざまなソフトウェアが開発され、認知行動療法を用いる治療者やクリニック等へのライセンスが行われている。Virtually Better による主なソフトウェアを、以下に紹介する。

#### (1) Virtual Airplane Places

これは、飛行機恐怖の治療用ソフトウェアであり、患者は HMD を装着することで、飛行機のシートに着席している状況に置かれる。窓の外や機内を見回すといった、インタラクティブな視覚刺激だけでなく、ボディソニックを付加した聴覚刺激により、臨場感の強化が意図されている。患者は、離陸、着陸に加え、飛行中の乱気流や気圧の変化による飛行機の動揺を体験する。治療者は、簡単なキー入力により、飛行中のさまざまなイベントを呈示することが可能である。

#### (2) Virtual Audiences Exposure

これは、対人恐怖症やスピーチ恐怖といった社会不安障害の治療用ソフトウェアであり、患者は HMD を装着することで、治療者が制御可能な聴衆が目前にいるという状況に置かれる。患者は、この聴衆の前でのプレゼンテーションを求められ、治療者はキー操作により聴衆の態度を、賞賛や退屈、興味など、さまざまに変化することが可能である。

#### (3) Height Environments

これは、高所恐怖症の治療用ソフトウェアであり、ガラス張りのエレベータと橋梁の仮想空間で構成されている。エレベータは、46 階建てのホテルの内側に位置し、患者はジョイスティックによって昇降を制御する。一方、橋梁では、高さの異なる峡谷に橋がかけられており、これを渡るというタスクが課される。ここでは、高度が増すほど、風の音が大きくなるという演出がなされ、立体視のオプションが効果的である。

#### (4) Storm Environments

これは、雷恐怖の治療用ソフトウェアであり、患者は大きな窓のある部屋の椅子に座するという状況に置かれる。治療者はキー操作により、天候を快晴から暴風雨まで変更すると同時に、落雷や停電などのイベントを発生させることが可能である。室内のテレビのテクスチャーを入れ替えることで、臨場感の強化を図ることができる。

#### (5) Virtual Vietnam Environments

これは、ベトナム戦争から帰還した退役軍人を対象とした、心的外傷後ストレス障害

(Post Traumatic Stress Disorder : PTSD) の治療用ソフトウェアである。最近では、イラク版 (Virtual Iraq Environments) も開発されている。

### 3.6.3 国内での取り組み

わが国における VR エクスポージャーの取り組みは、宮野らによる簡易型のものが最初と思われる。具体的には、HMD とボディソニックを用いて通常のビデオ映像を呈示するというエクスポージャーを雷恐怖症の治療に適用し、その有効性を示している<sup>4)</sup>。欧米に比べ、わが国では VR エクスポージャーへの取り組みは少ないといえるが、最近の動向として、VR エクスポージャーを専門とする東京サイバークリニックの設立があげられる。2005 年に開設されたこのクリニックでは、飛行機恐怖、高所恐怖、対人恐怖、スピーチ恐怖、その他の雷やクモといった単一恐怖の治療に、VR エクスポージャーを実施している<sup>5)</sup>。

また、早稲田大学では、2004 年度に「先端科学と健康医療の融合拠点の形成」という課題が、文部科学省による戦略的研究拠点育成プログラムに採択されたが<sup>6)</sup>、筆者らはその一環として、VR エクスポージャーの研究開発プロジェクトを進めている。具体的には、パニック障害を対象とした VR エクスポージャー用ソフトウェアを開発している<sup>7)</sup>。パニック障害とは、動悸、発汗、ふるえ、息苦しさや、自分をコントロールできない恐怖感といった、パニック発作を繰り返すという病気である。米国では 100 人に 3 人の割合で発症しており、日本でもほぼ同率の患者がいると考えられている<sup>8)</sup>。パニック障害に伴う広場恐怖、例えば飛行機恐怖症や高所恐怖症などの治療には、VR エクスポージャーが有効とされ、上述のように欧米では 1990 年代の半ばから、すでに実用化されている。一方で、VR エクスポージャーの効果については、統制された条件での臨床データが少ないことが、問題として指摘されている。そこで当該プロジェクトでは、開発したソフトウェアの治療効果を in vivo エクスポージャー群と比較することで、VR エクスポージャーの位置づけを図ることを目的としている。

当該 VR エクスポージャーの対象としては、パニック障害の頻度の高い地下鉄場面を選定した。開発したソフトウェアは、インタラクティブな 3 次元映像とバイノーラル立体音響が VR オーサリング環境 (オメガスペース, ソリッドレイ研究所) により統合され、HMD とボディソニックを用いて呈示される。とりわけ、治療に特化したインタラクティブ機能の設計・実装が主要な課題の 1 つであり、インタフェースとしての絞込みを行っている。また、治療効果の評価にあたっては、治療者要因を最小とするために、治療者マニュアルと患者テキストを作成し、実施準備を進めている段階である (2006 年 1 月現在)。



図 3.6-1 筆者らが開発中の VR エクスポージャーシステム  
体験者の頭部の動きに応じて、インタラクティブな 3 次元映像が呈示される

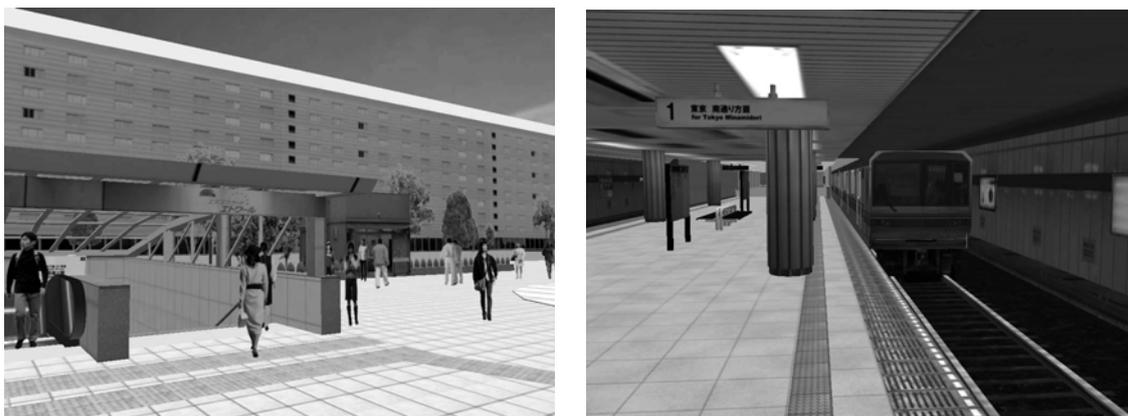


図 3.6-2 筆者らが開発中の VR エクスポージャーの画面 1  
(左：乗車駅へ入るシーン、右：車両がホームに到着するシーン)



図 3.6-3 筆者らが開発中の VR エクスポージャーの画面 2  
(左：地下鉄車両内のシーン、右：降車駅から出たシーン)

#### 3.6.4 まとめ

上述のように、パニック障害の発症頻度は人口の 3 パーセント程度と高率であり、インタラクティブな 3 次元情報の利活用にかかる市場性は、相応に有していると考えられる。特に、脅威場面を仮想的に再現するコンテンツは、日本独自のものが必要であるため、ハードウェアだけでなくソフトウェアやコンテンツの需要が見込まれる。また、そのビジネスモデルとしては、Virtually Better では専門クリニックや研究機関へのリース形式が取られているが、他にも多様な方法があると考えられる。さらに、VR エクスポージャーの普及・促進にかかる課題としては、大きく以下の 2 点があげられる。

##### (1) 開発コストの削減

地下鉄を例にすると、路線が違えば電車の外観や内装、駅構内の各種雰囲気異なってくる。そのため、患者の生活圏に合わせてコンテンツがカスタマイズされることが望ましいといえるが、その都度、1 から制作しては、膨大なコストがかかってしまう。したがって、VR 空間を構築する要素を標準化し、マルチユースを容易化する仕組みが必要となる。

##### (2) 臨場感の向上

VR エクスポージャーでは、患者に不安や恐怖を生起させることが前提であるため、臨場感をどこまで向上させられるか、ということが重要となる。特に、仮想空間に人間を登場させる際には、現状では実写ベースの表現が必須であり、CG モデルとのシームレスな

融合が求められる。また、脅威場面毎に臨場感向上の要件を検討し、再現性の高いシステムを効率的に開発するための方法論も必要となる。

#### 参考文献

- 1) 宮野秀市, 坂野雄二, VR を利用したエクスポージャー療法の展望, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 7 (4) , 575-582 (2002)
- 2) Rothbaum B O, Hodges L F, Kooper R, et al. : Effectiveness of computer-generated (virtual reality) graded exposure in the treatment of acrophobia. American Journal of Psychiatry, 152 (4) , 626-628 (1995)
- 3) <http://www.virtuallybetter.com/>
- 4) 宮野秀市, 貝谷久宣, 坂野雄二, 簡易型 VR エクスポージャーの試み - 雷恐怖症の 1 症例 -, 行動療法研究, 26 (2) , 97-105 (2000)
- 5) <http://www.tokyocyberclinic.com/>
- 6) <http://www.waseda.jp/scoe/>
- 7) 吉田菜穂子, Douglas Eames, 河合隆史, ほか, パニック障害治療用バーチャルリアリティソフトウェアの開発とその治療効果の検討, 第 5 回日本 VR 医学会 (2005)
- 8) 貝谷久宣, 不安恐怖症 - パニック障害の克服-, 講談社 (1996)

## 4 3次元画像のユーザビリティと安全性

### 4.1 CT・MRI からの3次元画像構築とバーチャルリアリティ制作

#### 4.1.1 汎用PC環境における3次元画像構築

医療機器の技術進歩によって、CTやMRIによる断層画像の解像度は向上し、より細かいスライス厚での撮影も可能になっている。こうして得られた断層画像は、それだけでも診断に有用な資料となるが、複数の断層画像から3次元形状を復元し、CGモデルとして表現することで、より直感的な3次元形状の把握が可能となる。さらに、それらの画像を利用した3次元画像生成も容易に行えるようになり、手術や診断支援への応用として、仮想内視鏡システムなどへの利用が期待されている。

一方でこれらのシステムは、専用のワークステーションが必要であることや、データに汎用性がない等の問題があり、システムの利便性を大きく損ねてしまっていたが、近年の汎用PCにおけるグラフィックス性能の向上により、一般の環境においても、モデル構築およびその表現が可能となってきた。そのため、医療分野における3次元画像の利用の拡大が期待され、市場の発展にも繋がると考えられる。しかし、実際の医療現場における3次元画像の具体的な構築方法などについては、あまり触れられてこなかったといえる。

そこで本稿では、CTやMRIによって得られる断層画像から3次元CGモデルを構築する手法について、汎用のコンピュータ環境での具体的な構築方法の例を挙げ解説する。モデル構築にかかる技術的な要件として、具体的なソフトウェアについて述べると共に、構築された3次元モデルのインタラクティブメディアへの応用として、バーチャルリアリティ（VR, Virtual Reality）コンテンツを制作する方法について解説する。VRコンテンツに必要な要件、および制作環境について紹介し、医療分野におけるVRコンテンツ市場の可能性について言及する。

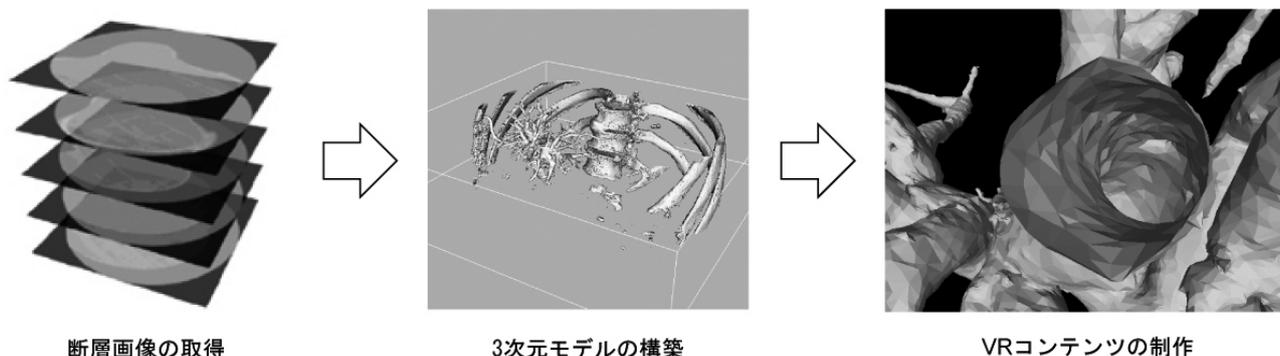


図 4.1-1 断層画像から VR コンテンツの制作までの流れ

#### 4.1.2 3次元形状データの形式と画像生成方法

3次元画像の定義として、ここでは、3次元モデルデータからリアルタイムで生成される任意の視点からの画像とする。得られる画像はスクリーンに投影された時点で2次元の情報となるため、画像自体のフォーマットとしては通常の画像形式となる。つまり、3次元モデルデータの記録方式、およびその形状データからの画像生成方式に違いが生じる。

医療用画像処理のワークステーションなどによる3次元画像の生成においては、ボクセルデータからのボリュームレンダリングによる表現が用いられることが多い。しかしながら一般のCG (Computer Graphics) 分野における3次元データとしては、ポリゴン方式が標準的であり、ボクセル形式のモデルデータはその汎用性について課題があるといえる。

そこで、汎用のPCにおけるモデルデータの利用、およびモデルデータを応用したコンテンツ制作を考慮し、一般的なCGソフトウェアでの扱いを容易にするため、汎用性の高いポリゴン形式でのポリゴンモデルの作成を行うこととした。

#### 4.1.3 CT断層画像からの3次元モデル作成

モデル作成の例として、胆嚢管癌を対象として胆管部の3次元モデル化を行った。モデル化に使用したCT画像は、512×512ピクセルで構成されたDICOM形式の画像で、1ピクセルあたりの解像度は約0.586mmであった。また、スライス厚は0.5mm、スライス間隔は0.2mmであった。CTによる断層画像から3次元モデル作成を行うソフトウェアについて、市販されているものをいくつか紹介する(表4.1-1)。

表 4.1-1 断層画像からの3次元モデル構築ソフトウェア

名称	販売	価格	Web サイト
Forge	Studio PON	US\$995	<a href="http://www.studio-pon.com/jp/">http://www.studio-pon.com/jp/</a>
ZedView	株式会社レキシ	¥680,000	<a href="http://www.lexi.co.jp/">http://www.lexi.co.jp/</a>
3D-DOCTOR	Able Software Corp.	US\$4,800	<a href="http://www.ablesw.com/">http://www.ablesw.com/</a>
Mimics	マテリアライズジャパン株式会社	¥2,508,000	<a href="http://www.materialise.co.jp/">http://www.materialise.co.jp/</a>
Sirius	株式会社デジタル・カルチャー・テクノロジー	¥320,000	<a href="http://www.dicult.com/">http://www.dicult.com/</a>

本例においてはWindowsプラットフォーム上で動作するForge (Studio PON) を使用した(図4.1-2)。断層画像からの形状データ構築では、画素の濃度値にしきい値を設定する

ことで、形状の表面となる境界を抽出する。明瞭な形状データを取得するためには、抽出する臓器と隣接する組織の画像中の画素値に、明確な差があることが必要となる。抽出された境界線を積層することで、3次元的な形状が得られる。断層画像の撮影ピッチ、スライス厚が、得られる形状の高さ方向の解像度に影響を与えるため、良好なモデルを構築するには断層画像撮影時に3次元モデル構築を考慮した設定を行う必要がある。



しきい値を設定することによる境界面の抽出と積層によるモデル化

図 4.1-2 断層画像からのモデルデータ構築

#### 4.1.4 バーチャル内視鏡コンテンツの制作

構築された3次元モデルを幅広く応用することを想定し、VRコンテンツの制作を行った。VRコンテンツの制作にはプログラミングの知識が必要となることが多かった。しかし、インタラクションの定義や出力環境に合わせた画像呈示などを簡便に行うための、VRオーサリングソフトウェアも製品として市販されている（表 4.1-2）。

表 4.1-2 VR オーサリングソフトウェア

名称	販売	価格	Web サイトなど
Omega Space	株式会社ソリッドレイ研究所	¥840,000	<a href="http://www.solidray.co.jp/">http://www.solidray.co.jp/</a>
EON Studio	EON Reality Inc.	¥1,200,000	<a href="http://www.eonreality.com/">http://www.eonreality.com/</a> (フリー版 EON Studio Personal Edition あり)

本例では EON Studio Personal Edition (EON Reality) を用いて、制作した3次元モデルにインタラクションを付加した。胆管モデルを全体的に俯瞰する視点と、管状臓器を内部から観察する仮想内視鏡視点での観察を可能にするため、視点カメラの移動方法の設定を行った。また、それぞれの視点の切り替えもインタラクティブに変更可能とした。この設定によって、多面的な観察を行うことが可能となった（図 4.1-3）。

画像の観察方法、およびそのユーザインタフェースの設計については、通常、ソフトウェアごとに固有であるが、医療用 3 次元画像の場合、画像の観察は診断を行うことと同義であると捉えることができる。そのため、その操作性や機能については、実際の現場における使用を考慮する必要があると言える。

また、VR コンテンツとして作成することで、様々な環境での観察が可能となった。例えば、大型のスクリーンでの呈示や小型 PC での呈示、さらには立体映像としての呈示も行うことができ、コンテンツの利用場面の拡大が容易に可能となった。



図 4.1-3 VR コンテンツによる 3 次元胆管像の観察（左：俯瞰視点、右：内視鏡視点）

#### 4.1.5 医療分野における VR コンテンツの活用

今回制作した仮想内視鏡コンテンツのように、CT 断層画像からの 3 次元モデルの作成、および VR コンテンツの制作は、一般的な PC 環境においても手軽に実現が可能となってきた。医療分野における 3 次元画像の利用に関して、容易にコンテンツ制作が行える環境が整うことで、市場の拡大が期待される。同時に、医学的知識を持ったコンテンツクリエイターの育成や、医師の 3 次元画像に対する意識の向上などが問題として挙げられ、市場の拡大にはその教育環境の整備が求められると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 鳥脇純一郎：X 線像のコンピュータ支援診断—研究動向と課題、電子情報通信学会論文誌 J83-D-II(1)；3-26, 2000
- 2) 中郡聡夫, 他 8 名：バーチャル内視鏡、総合臨床 54(9)；2448-2452, 2005

## 4.2 映像による生体影響

医療分野では、従来の内視鏡に加え 3 次元内視鏡や拡張現実感による手術ナビゲーションなど治療技術における映像の利用やその役割が拡大しつつある。こうした映像の利用は、患者に負担が少なく、また迅速でかつ精度の高い医療技術の普及に大きく貢献すると考えられる。ただし、映像の利用によっては、テレビや映画、ビデオゲームなどで知られている映像酔いや眼精疲労など、映像による生体への好ましくない影響が発生する可能性があり、これらに対する配慮が必要である。例えば、シミュレータによる映像酔いでは、後述するように、業務によっては重大な危険性につながる可能性が考慮されており、人の生命に関わる医療現場においてもそのリスクにどう対処するか十分な配慮が求められる。従って、映像等のインターフェースを駆使した高度な医療技術の開発とともに、映像による生体影響を防止するための技術開発が必要不可欠である。

映像酔いや眼精疲労については、まだ明らかにされるべき点が多いが、本稿では、それぞれ具体的な症状や特徴と発生機序の仮説、またその生体影響の計測手法について述べるとともに、現在までに明らかにされている影響要因や対処法などについて概説する。

### 4.2.1 映像酔い

映像酔いは、一般の人々が 8 ミリカメラ等の普及により映像を撮影し、映写機で投影するようになって、いわゆる手ぶれ映像を通して知られるようになったと思われる。実際の報告例としては、2003 年に日本の中学校にて、授業中に手持ちのビデオカメラで撮影された映像を生徒が視聴したところ生徒 294 名のうち、36 名が病院で手当を受けるという事例がある<sup>1)</sup>。しかしこの他にも、映画やビデオゲームなどで視点のダイナミックな変化などで映像酔いが生じやすいことが知られている。

映像酔いは動揺病<sup>2,3)</sup>に類似するが、視覚的な運動によって引き起こされるもので、手ぶれを含むような映像や、ダイナミックな動き（例えば 1 人称視点で動き回るような映像）などで発症しやすいと考えられている。一般的な症状としては、いわゆる乗り物酔いと同様に、初期症状として、目まい、倦怠感、ねむけ、顔面蒼白や、さらに冷や汗、唾液の増加、胃の不快感などが現れ、最終的に吐き気や嘔吐などが生じる<sup>2~4)</sup>。映像酔いは、多くの場合比較的軽度の不快感であり、酔いを引き起こした映像視聴を止めた後、数時間以内に症状が軽減すると考えられるが、人によっては耐え難い症状となって現れ、1 日程度そうした症状が継続することもある。また、シミュレータでの映像酔いでは、運動失調を生

じることとも知られており、米国海軍ではシミュレータ酔い経験者は、シミュレータ訓練後24時間以内の実機搭乗が禁止される<sup>5)</sup>など、業務によっては重大な危険性につながる可能性が考えられている。

映像酔いの発生機序については、動揺病と同様に感覚不一致説<sup>3)</sup>による説明が、一般によく受け入れられている。これは、身体の動きについての視覚系や前庭系、体性感覚系などのさまざまな感覚系の情報の組合せ関係が、それまでの経験によって確立したそうした感覚系の情報の組合せ関係と一致しない時に、自己の空間定位が不安定となり、不快症状が発生するという考え方である。一方、生理学的観点からは、脳幹に位置する前庭核では、前庭系からの入力他に、視覚系、体性感覚系、小脳からの入力が報告されており<sup>6)</sup>、こうした感覚情報間の統合を行っていると考えられる。また前庭系と自律神経系とは、解剖学的にも電気生理学的にも密接な関係にあることが知られており<sup>7)</sup>、これは酔いによる不快症状との関係を強く示唆する。一方、酔いを引き起こすような回転負荷をラットに与えると、視床下部や脳幹のヒスタミン濃度が上昇することから、これが動揺病における嘔吐に関連すると考えられている<sup>8)</sup>。

映像酔いによる生体影響の計測手法には、主観的評価などの心理学的計測手法と、自律神経活動に関する計測などの生理学的計測手法とがある。主観評価による計測手法として、映像酔いで、広く研究者の間で利用されているのは、Simulator Sickness Questionnaire (SSQ)である(表 4.2-1 参照)。これは、Kennedy et al. (1993)<sup>4)</sup>が、Motion Sickness Questionnaire (MSQ) についての1,119 ペア(シミュレータ体験の前後での計測)のデータを因子分析することで、シミュレータ酔いについて、より有効な16の主観評価項目

表 4.2-1 Simulator Sickness Questionnaire

(オリジナル)	(和訳)
1. General discomfort	一般的な不快感がある
2. Fatigue	疲労感がある
3. Headache	頭痛がする
4. Eyestrain	眼が疲れている
5. Difficulty focusing	眼の焦点がぼける
6. Increased salivation	唾液が増えている
7. Seating	発汗している
8. Nausea	吐き気がする
9. Difficulty concentrating	集中できない
10. Fullness of head	頭が重い
11. Blurred vision	眼がかすむ
12. Dizzy (eyes open)	(眼を開けた状態で)フラットする ようなめまい感がある
13. Dizzy (eyes closed)	(眼を閉じた状態で)フラットする ようなめまい感がある
14. Vertigo	自分や周囲が回転するよう なめまいがある
15. Stomach awareness	胃の存在感がある
16. Burping	げっぷがでる

を抽出し、作成したものである。回答者は、それぞれの項目について、4つの選択肢(”None [無し]”、”Slight [わずかに]”、”Moderate [中程度]”、”Severe [激しく]”)から1つを回答する。この他に、鶴飼ら(2000)はビデオゲームを頭部搭載型ディスプレイ(HMD)を利用して行った時の生体影響を調べるために、過去に提案されている評価項目を参考にして28項目を選択し、7段階の評価を参加者に実施したところ、映像酔いによる影響と眼精疲労による影響とを評価項目間で分離可能であることを報告している<sup>9)</sup>。

生理学的計測手法については、さまざまな手法が試みられている。心拍数(またはR-R間隔)やその変動<sup>10~12,14)</sup>、HF/LF比<sup>11)</sup>(心拍変動のパワースペクトルの高周波成分[0.15 Hz以上]の低周波成分[0.05~0.15 Hz]に対する割合)、さらに呼吸数<sup>13)</sup>や胃電図<sup>12~14)</sup>や皮膚抵抗値<sup>12,14)</sup>、発汗量<sup>13)</sup>などが自律神経活動に関連する生理学的指標として検討されている。いずれも基本的には研究レベルであるが、多くの指標について映像酔いとの関連が報告されている。心拍数が視覚刺激観察後の酔いに関する主観評価値と正の相関を示すこと<sup>10)</sup>や、映像視聴によって吐き気を報告した観察者では、同じく心拍数も増加する<sup>13)</sup>。また、動揺病に対する感受性の高い観察者では、LF/HF比が増加する<sup>11)</sup>。さらに、0.1 Hz近傍(Meyer波帯)の血圧と心拍数の相互相関関数の最大値である $\rho_{\max}$ は、映像視聴によるSSQのスコアの高い群の方が、低い群よりも、視聴が進むにつれて有意に低下することが報告された<sup>15)</sup>。また、これらの指標の他にも、身体動揺<sup>16~18)</sup>、瞬きの回数<sup>13)</sup>などが映像酔いに関連する指標として報告されている。

映像酔いを誘引・増幅する要因については、視覚情報(または映像)の内容に関わる要因、視覚情報の提示に関わる要因、観察者の要因の3つに分けることができる<sup>19)</sup>。このうち視覚情報の内容に関わる要因については、大型スクリーンやHMDによる映像提示、さらに視覚回転ドラムなどを用いて研究が行われてきた。そして、仮想的なヨー軸、ピッチ軸、ロール軸回りの回転の影響<sup>19~21)</sup>や、そうした回転速度<sup>20,22)</sup>や振動の周波数と振幅などの影響<sup>23)</sup>が報告され、また映像のナビゲーションの速さ<sup>24)</sup>、空間的な複雑さの影響<sup>25)</sup>などが報告された。例えば、ヨー軸、ピッチ軸、ロール軸回りに一方向に回転するような映像では、仮想的な回転速度として30~70 deg/sで、主観評価のスコアや身体動揺<sup>20)</sup>、胃電図<sup>22)</sup>などがより大きな値を示すこと、仮想空間を移動しながら頭部運動による風景の方向変化を体験するような映像では、そのナビゲーション速度の増加とともに主観評価のスコアが増加すること<sup>24)</sup>などが示されている。

次に、視覚情報の提示に関わる要因については、主に映像の大きさ(特に視角的大きさ)についていくつかの報告がある<sup>26~28)</sup>。視角的大きさが比較的大きい場合については、ドライビングシミュレータを用いた実験で、前方の風景を投影するスクリーンの横幅の拡大

とともに SSQ のスコアが増加すること<sup>26,27)</sup>、ただし、横幅が 140 deg 以上では SSQ のスコアが飽和すること<sup>26)</sup>などが報告された。一方、視角的大きさが比較的小さい場合については、映像酔いを生じやすい映像を提示して、ディスプレイの大きさがある程度以上 (34 × 26 deg) になると SSQ のスコアが有意に大きくなること<sup>28)</sup>が示された。

観察者の要因については、従来の動揺病で検討されてきた性別などについての報告がある。多くの報告は、女性の方が男性よりも主観評価のスコアが大きく、酔いの程度が高いことが報告されている<sup>29~31)</sup>。ただし、観察者要因に関する実験報告は、参加者の選択の問題や、主観応答の結果については応答自体の特性 (性差など) について、十分に検討する必要がある。

映像酔いに対する予防的対処法には、できるだけ映像酔いしにくい映像やその提示環境を用意することと、それを利用する人間側で対応するものに分けることができる。映像酔いしにくい映像やそうした提示環境については、未だ未解明で十分な対策の立てにくい部分もあるが、可能ならば映像の視角的大きさをできるだけ小さくして観察するという対策は考えられる。ただし、小さくすることによって映像自体が見にくくなる可能性があり、医療機器のように映像に基づいて、精緻な作業を行う場合には良い対策とは言えない。一方、人間側での対応としては、1 つには映像酔いに慣れることが挙げられる。従来の動揺病と同様に、映像酔いについても順応効果が報告されており、映像酔いを繰り返し経験することで、そうした症状が緩和する<sup>32)</sup>。ただし苦痛を伴うため、これもあまり良い対策とは言えない。これに対し、従来の動揺病と同様に、薬物を利用する方法が挙げられる。動揺病に対しては、交感神経作用薬、副交感神経遮断薬、抗ヒスタミン薬などが有効とされている<sup>33)</sup>。ただし、交感神経作用薬は法的規制の対象であり、利用できない。副交感神経遮断薬については、コリン作動性物質により分泌の促されるバソプレシンの動揺病への関与が示唆される<sup>34)</sup>ことから、抗コリン薬 (スコポラミン) が利用されているが、副作用として、自律神経活動への影響、視機能への影響、記憶や動作などへの影響などが報告されている<sup>35)</sup>。また、ヒスタミン作動性神経を抑制する抗ヒスタミン薬なども利用される<sup>36)</sup>。その他、可能な限り体調のすぐれない時には映像を見ないなどの基本的な対策が考えられる。また、特異的な方法としては、針や指圧などによる方法も研究が行われている<sup>37,38)</sup>。

#### 4.2.2 眼精疲労

眼精疲労は視覚情報端末 (VDT) が、とりわけオフィス環境に導入されたあたりから注目されるようになった。例えば、労働省による「平成 10 年技術革新と労働に関する実態

調査」<sup>39)</sup>では、事務管理等部門でのコンピュータ機器使用の割合は9割以上に上り、使用者の4割近くが機器使用による疲労やストレスを感じ、さらに自覚症状として9割近い人々が眼の疲れや痛みを訴えている。一方、アミューズメント施設などでの立体映像の普及とともに、立体映像による眼精疲労が認識され始めた。

眼精疲労はさまざまな原因で発症するが、立体映像の観察によって生じたり、さらに近距離の映像等への過度な集中によるストレスや映像中にコントラストの高い幾何学的パターンが含まれたりすると発症する。一般的な症状としては、頭痛、倦怠感、ねむけ、視力の低下、像が二重に見える複視、目の赤み、痛みを伴う眼球の炎症などがあげられる<sup>40)</sup>。こうした症状の多くが、映像酔いの症状と共通するため、映像自体に酔いを誘発する要因と眼精疲労を誘発する要因が含まれると、どちらが主因なのか、両者が原因なのかなど、判断が難しい場合がある。

眼精疲労の計測法には、主観評価と客観的計測法とが提案され、研究レベルで利用されてきた。主観評価としては、先述の鶴飼ら（2000）の28項目の主観評価計測が挙げられる<sup>9)</sup>。一方、客観的計測法としては、基本的に視機能に関する計測が多く、フリッカー計測、調節近点距離、調節時間、瞬き頻度、視認時間、眼球運動、視覚誘発電位などがあげられる<sup>41)</sup>。なお、立体ディスプレイでの眼精疲労については、両眼融像幅の指標としての有効性が報告されている<sup>40)</sup>。

眼精疲労の発生機序については明確ではないが、さまざまな要因が考えられている。このうち、VDT作業による眼精疲労については、多くの研究が行われており、その概説としてBlehm et al.（2005）<sup>42)</sup>を参照されたい。また、幾何学的パターンによる眼精疲労については、Wilkins（1995）<sup>43)</sup>が光感受性の患者と対比させる形で健常者に関するデータを詳細に検討し、光感受性発作を生じやすい視覚条件では、健常者でも不快症状を発症しやすいことを報告している。立体映像による眼精疲労の要因としては、表示システムの原理的な要因について、水晶体の調節と両眼の輻輳との非整合性が関連すると考えられている<sup>44,45)</sup>。実際に調節刺激と輻輳刺激の示す光学的距離が異なる場合、調節反応は調節刺激による調節と輻輳性調節とのバランス点に収束し<sup>45)</sup>、視覚的負担が調節機構に生じていることが推察される。また、Emoto et al.（2004）は、立体ディスプレイでは通常のディスプレイに比べ、同一の映像の観察による不快度の主観評価値が増加し、両眼融像幅が減少することから、この融像幅が眼精疲労の指標として有効であるとしている<sup>40)</sup>が、さらに輻輳と調節の不一致の増加<sup>46)</sup>やその変動に伴って融像幅の減少<sup>47)</sup>を報告しており、眼精疲労の増加が指摘されている。また、過大な両眼網膜像差（binocular disparity）の提示やそれにもなつて生じる複視などによる視覚機能への負担が、眼精疲労の要因になっている

ことも十分に考えられる。さらに表示システムの構造的要因として、両眼用の2つの映像間での輝度や色、サイズなどの不一致、両眼用の視軸の平行性、さらには過大な両眼視差 (binocular parallax) の提示もあげられる<sup>48)</sup>。なお、視機能計測によれば両眼視機能の発達は10歳くらいまで続くと見られ<sup>49)</sup>、この間に調整不良の立体視の機器使用により、子どもたちが斜視を引き起こす可能性があり、実際に4歳の子どもが立体映像を視聴後に斜視になったとする報告がある<sup>50)</sup>。このように、立体ディスプレイの眼精疲労については、輻輳と調節との非整合性や過大な両眼の映像の不均衡 (輝度や色の相違) など多くの要因が考えられているが、Kooi and Toet (2004)<sup>48)</sup>はこれら多くの要因による不快感への影響を調べている。彼らによれば、左右眼用の映像ペアの縦方向のずれや、クロストークといわれる他方の画像のわずかな映り込み、さらに映像のボケなどが比較的不快度との関連があるとしている。

眼精疲労に対する予防的対処法には、できるだけ眼精疲労しにくい映像やその提示環境を用意することと、それを利用する人間側で対応するものに分けることができる。眼精疲労しにくい映像として、Wilkins (1995)<sup>43)</sup>の示すような明るさのちらつきや縞パターンを含まない映像が挙げられる。また、立体ディスプレイの観点では、過大な視差やそれによってもなって複視を生じるような映像は避けるべきであり、さらに、映像の切り替わりで両眼網膜像差の過大な変化が無いようにする。一方、提示環境については、特に立体映像に関して、表示デバイスの観点から、定性的には以下のような点が挙げられる。

- 1) 左右眼の映像の大きさや位置のずれ、色や輝度、コントラスト等の相違をできるだけ無くし、クロストークを抑えること。
- 2) 左右眼のディスプレイの配置によって、視対象の対応点が限界を超えるような輻輳を誘引しないようにする。
- 3) 色フィルタによるアナグリフ式のデバイスは基本的に利用しないか、短時間の利用に限る。
- 4) HMD などでは、デバイスの射出瞳に、観察者の瞳孔中心が収まるようにする。

なお、立体表示装置には、輻輳と調節の非整合性による眼精疲労を軽減するための手法を取り入れた方式がいくつか提案されている。

一方、人間側での対応としては、基本的に立体映像は長時間の連続的な観察を行わないこと、不快症状が現れた場合にはそれ以上の観察を続けないこと、観察前には過労や睡眠不足などの疲労を十分にとっておくこと、また立体映像を作業現場等で利用する場合には、それらの対処が可能となるような利用体制を整備することなどが挙げられる。

### 4.2.3 まとめ

映像のさまざまな利用は、その制作技術と表示技術との進歩により、今後ますます普及していくものと思われる。医療分野におけるそうした映像技術の利用は、患者への負担を軽減したり、より正確な診断・治療に大いに貢献したりするものと期待されている。ただし、そうした技術を道具として利用する医療関係者が、映像による生体影響を受けることがあれば、たとえ主たる技術はすぐれたものであっても、有効な利用が期待できないことも十分に生じ得る。従って、映像の生体影響を軽減する技術の確立も着実に進めていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) Ujike H, Ukai K, Nihei K: Displays (submitted)
- 2) Money KE: Physiological Reviews, 50, 1-39 (1970)
- 3) Reason JT, Brand JJ: Motion sickness. London: Academic Press (1975)
- 4) Kennedy RS, Lane NE, Berbaum KS, Lilienthal MG: International Journal of Aviation Psychology, 3, 203-220 (1993)
- 5) U.S. Navy: OPNAVINST 3710.7T. (2004)
- 6) Barmack NH: Brain Research Bulletin, 60, 511-541 (2003)
- 7) Balaban CD, Porter JD: Journal of Vestibular Research, 8, 7-16 (1998)
- 8) Takeda N, et al.: Acta Otolaryngologia, 101, 416-421 (1986)
- 9) 大野さちこ, 鶴飼一彦: 映像情報メディア学会誌, 54, 887-891 (2000)
- 10) Holmes SR, Griffin MJ: Journal of Psychophysiology, 15, 35-42 (2001)
- 11) Yokota Y, et al.: Acta Otolaryngologia, 125, 280-285 (2005)
- 12) Kim YY, et al.: Psychophysiology, 42, 616-625 (2005)
- 13) Himi N, et al.: Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical, 116, 46-53 (2004)
- 14) Hu S, et al.: Aviation, Space, and Environmental Medicine, 62, 308-314 (1991)
- 15) 杉田典大ら: 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 9, 369-376 (2004)
- 16) Stoffregen TA, Smart LJ Jr.: Brain Research Bulletin, 47, 437-448 (1998)
- 17) Owen N, Leadbetter AG, Yardley L: Brain Research Bulletin, 47, 471-474 (1998)
- 18) Smart LJ Jr, Stoffregen TA, Bardy BG: Hum Factors, 44, 451-465 (2002)
- 19) Lo WT, So RHY: Applied Ergonomics, 32, 1-14 (2001)
- 20) Ujike H, Yokoi T, Saida S: Proceedings of 26th Annual International Conference

of IEEE EMBS, 2399-2402 (2004)

- 21) 氏家弘裕, 鶴飼一彦, 齋田真也: 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 9, 377-386 (2004)
- 22) Hu S, Stern RM, Vasey MW, Koch KL: Aviation, Space, and Environmental Medicine, 60, 411-414 (1989)
- 23) Ujike H, Kozawa R, Yokoi T, Saida S: Proceedings of 11th International Conference on Human-Computer Interaction (2005)
- 24) So RHY, Lo WT, Ho ATK: Human Factors 43, 452-461 (2002)
- 25) So RHY, Lo WT: Presence, 10, 193-215 (2000)
- 26) Lin JW, et al.: Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference 2002, 164-171 (2002)
- 27) Seay AF, et al.: Proceedings of IEEE Virtual Reality Conference 2001, 299-300 (2001)
- 28) Ujike H, Yokoi T, Saida S: Proceedings of 12th International Display Workshop, 1727-1730 (2005)
- 29) Jokerst MD, et al.: Aviation, Space, and Environmental Medicine, 70, 962-965 (1989)
- 30) Kennedy RS, et al.: SAFE Journal, 25, 69-76 (1995)
- 31) Flanagan M, May JG, Dobie TG: Aviation, Space, and Environmental Medicine, 76, 642-646 (2005)
- 32) Hill KJ, Howarth PA: Displays, 21, 25-30 (2000)
- 33) 高橋正紘: 動揺病, 小松崎篤 編集, CLIENT 21 No. 8 めまい・平衡障害, 東京: 中山書店 (1999)
- 34) Kim MS, Chey WD, Owyang C, Hasler WL: American Journal of Physiology, 272, G853-G862 (1997)
- 35) Parrott AC: Aviation, Space, and Environmental Medicine, 60, 1-9 (1989)
- 36) Muth ER, Jokerst M, Stern RM, Koch KL: Aviation, Space, and Environmental Medicine, 66, 1041-1045 (1995)
- 37) Yoo SS, Teh EK, Blinder RA, Jolesz FA: Neuroimage, 22, 932-940 (2004)
- 38) Miller KE, Muth ER: Aviation, Space, and Environmental Medicine, 75, 227-234 (2004)
- 39) 労働大臣官房政策調査部統計調査第二課編: 技術革新と労働に関する実態調査報告

平成 10 年，労働大臣官房政策調査部（1999）

- 40) Emoto M, Nojiri Y, Okano F: *Displays*, 25, 67-76 (2004)
- 41) 畑田豊彦: 17.6 VDT と目の疲労，大山正，他編，新編感覚・知覚ハンドブック，東京：誠信書房（1994）
- 42) Blehm C, et al.: *Survey of Ophthalmology*, 50, 253-262 (2005)
- 43) Wilkins AJ: *Visual Stress*, Oxford: Oxford University Press (1995)
- 44) Wann JP, Rushton S, Mon-Williams M: *Vision Research*, 35, 2731-2736 (1995)
- 45) Okada Y, et al.: *Vision Research*, 46, 475-484 (2006)
- 46) 江本正喜，矢野澄男: 映像情報メディア学会誌, 56, 447-454 (2002)
- 47) 江本正喜: 映像情報メディア学会誌, 56, 101-110 (2002)
- 48) Kooi FL, Toet A: *Displays* 25, 99-108 (2004)
- 49) Hughes LE, Wilkins AJ: *Journal of Research in Reading*, 233, 314-324 (2000)
- 50) 筑田昌一，村井保一: 日本視能訓練協会誌, 16, 69-72 (1988)

### 4.3 健康維持・増進、リハビリテーションへの 3次元映像の応用

#### 4.3.1 はじめに

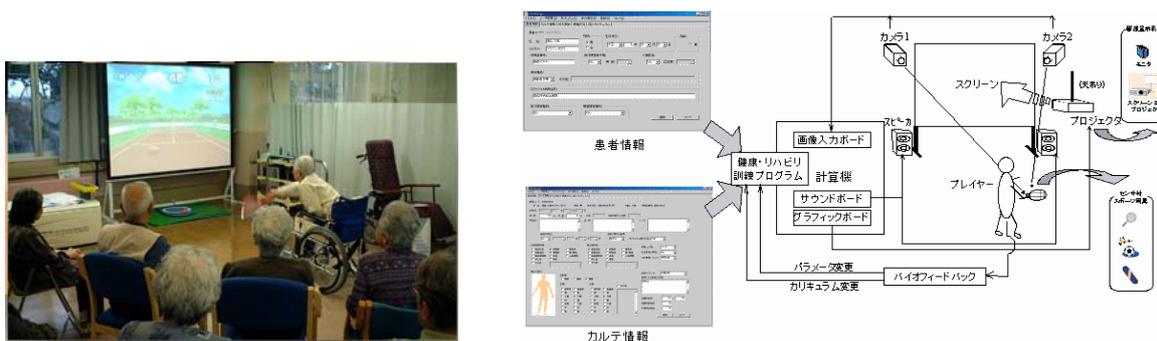
ここでは、健康維持・増進ならびにリハビリテーション分野において、VR（Virtual Reality）技術や 3次元情報をインタラクティブに利用したシステムについて、国内にて事業化、実用化されている事例を中心に報告する。ここでは 7つの事例を紹介するが、これらの事例における 3次元映像の活用方法は、大別すると以下ようになる。

- ① 健康維持・増進における 3次元情報のインタラクティブ利用（立体映像は伴わない）：
  - ・ VR スポーツシステム<sup>1)</sup>、乗馬療法システム<sup>2)</sup>、HMD 型眼振計<sup>2)</sup>
- ② 健康維持・増進（視力向上）への立体映像の積極活用：
  - ・ ビジュアルトレーニングシステム<sup>3)</sup>
- ③ リハビリテーションへの興味・モチベーションの維持・向上のための立体映像付与：
  - ・ 立体映像リハビリテーションシステム<sup>4,5)</sup>、遊ブリテーションシステム<sup>6)</sup>、運動機能障害者向リハビリ支援装置<sup>7,8)</sup>

## 4.3.2 健康維持・増進分野における実用化事例

### (1) VR スポーツシステム<sup>1)</sup>

計算機内に作り出されたバーチャルなスポーツ環境においてプレイするシステムであり、仲間と一緒に楽しく健康維持・増進が行える。適切なトレーニングメニューにより生活習慣病や高齢者転倒事故などを予防し、老人医療費の低減を図ることも狙いとしている。



(a) 使用例

(b) システム構成図

図 4.3-1 VR スポーツシステム ((文献 1)より引用)

例えば、VR テニスではバーチャル空間内にコート・相手プレイヤー・ボールを作り出し、プレイヤーは TV やスクリーンなどの視覚呈示装置上のボールをセンサ付ラケットにより打ち返す。その他、サッカー・スノーボード・ピンポンなど様々なスポーツがプレイできる。

本システムは、香川大学工学部、香川大学医学部、徳島大学医学部、奈良県立医科大学による学際領域の共同研究開発の成果であり、(株) VR スポーツより商品化されている(図 4.3-1)。

### (2) 乗馬療法システム<sup>2)</sup>

乗馬療法は、馬に乗ることで、背筋・腹筋を中心とする筋力強化、腰痛の予防とバランス感覚の改善を図るものであり、欧米では障害を持った方や高齢者の身体的、心理的なリハビリとして広く親しまれている。なかでもドイツでは医療行為として認可されている。

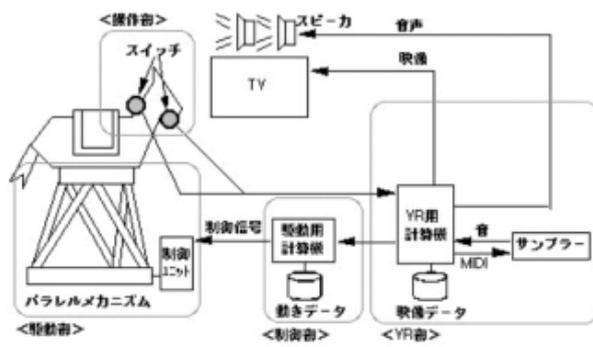
本システムは、乗馬療法をベースに、松下電工(株)が開発、商品化したものである(図 4.3-2)。実馬の鞍の動きを再現しており、騎乗者は意識的な努力をしなくても容易にトレーニングできる。すなわち、このシステムに乗った人は、落ちないようにとバランスを取ろうとする際に、自然に体幹の筋肉を使うことによって無理なく筋力がつき、腰痛の予防にもなり、平衡能も向上する。屋内や狭い場所でも手軽に楽しみながら訓練ができる。

VR 技術も取り入れ、ディスプレイに映し出される映像をインタラクティブに体験できる。

本システムの動きの中から、腹筋・背筋を鍛えるために一番効果の高い、前後スライド・前後スイング・左右スイングの動きを独自の 3 次元機構で実現し、一般家庭向けに開発されたシステムが「ジョーバ」である。現在では、6 千～7 千台／月を販売するヒット商品となっている。



(a) 体験風景



(b) システム構成図



(c) 一般家庭向ジョーバ

図 4.3-2 乗馬療法システム ((文献 2)より引用)

### (3) HMD 型眼振計<sup>2)</sup>

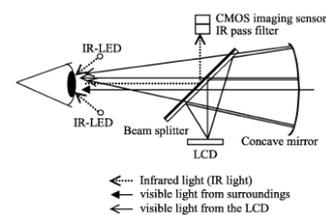
省スペース、時間短縮、多機能検査を特徴とする新しい眼球運動検査装置で、松下電工(株)が開発、商品化したものである(図 4.3-3)。従来の電極式検査のような外部映像刺激装置の準備や患者顔面に電極を張り付ける手間が不要であり、VR 技術と画像処理技術の組合せにより、本体とゴーグルだけで、映像刺激負荷と眼球運動計測、および眼振図記録が可能である。ゴーグル内では、3m 前方に約 120 インチスクリーンに相当する映像が映し出され、一連のめまい検査が行える。



(a) 使用例



(b) 全体システム構成



(c) ゴーグル内模式図

図 4.3-3 HMD 型眼振計 ((文献 2)より引用)

#### (4) ビジュアルトレーニングシステム<sup>3)</sup>

家庭のテレビでイケアできる、1日3分間の立体映像による視力向上のためのツールとして、(株)アイパワースポーツが開発、商品化したものである(図4.3-4)。

フリッカを軽減する工夫が成された時分割シャッタ眼鏡を装着して、専用のビジュアルトレーニングプログラム(コンテンツ)を見ると、立体映像の広い空間が再現される。コンテンツに登場するイルカやアゲハ蝶の「動作速度」や「色彩」などがプログラミングされており、映像を見ているだけで自然に眼の筋肉がストレッチングされる。さらに、気分的なリラックスを図るためのヒーリングサウンド付与されている。



(a) 使用例



(b) 製品構成

図 4.3-4 ビジュアルトレーニングシステム ((文献 3)より引用)

### 4.3.2 リハビリテーション分野における実用化事例

#### (1) 立体映像リハビリテーションシステム<sup>4)</sup>

歩行訓練などの単調なリハビリテーションのモチベーション向上を目的とした立体映像システムであり、早稲田大学河合研究室が、早稲田大学野呂研究室、昭和病院、(株)日立製作所と連携して開発したものである(図4.3-5)。国内外の寺院や公園など、観光や散歩を想定した立体映像コンテンツの提示によって、臨場感を高め、患者の積極的な行動を促している。

トレッドミル型歩行訓練機に搭載した立体ディスプレイは、指向性反射スクリーンを用いた投射型であり、特殊なメガネを着用することなく、大画面の立体映像を、明るい部屋でも鑑賞することが可能である。



(a) 使用例



(b) システム外観

図 4.3-5 立体映像リハビリテーションシステム ((文献 5) より引用)

## (2) 遊びリテーションシステム<sup>6)</sup>

高齢者の心身活性化（介護施設の入居者対象サービス、デイケア・デイサービスなど）、治療中のストレス・不快感緩和（がん化学療法・透析など）などを目的とした VR 応用心身ケアシステムであり、三菱電機（株）が開発、商品化したものである（図 4.3-6）。利用者の動きに対応して大画面の立体映像が変化し、音や振動も取り入れながらゲーム感覚で楽しく身体を動かせる。また、車椅子に座ったままで手だけでも楽しめる。

立体映像提示は、60 インチの背面投影型傾斜スクリーンを用い、これを偏光メガネで見ることで実現している。「バーチャルマラカス」と呼ばれる装置を用いて仮想物体を叩くといったバーチャル環境とのインタラクション機能を有する。「バーチャルマラカス」は、3次元位置計測のための LED マーカ、仮想物体との接触の感覚を振動で与える振動子、音響提示用のスピーカを一体化して、マラカスのような形状にしたものである。また、利用者の動きの評価を行うために、バーチャルマラカスの LED マーカの 3次元位置データを記録する機能や、表情の変化を見て利用者（特に痴呆性高齢者）の精神機能活性化の評価を行うために、CCD カメラ 3 台により顔表情を撮影してビデオ記録できる機能なども組み込まれている。



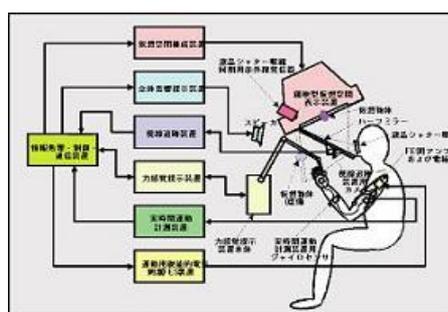
図 4.3-6 遊びリテーションシステム ((文献 6) より引用)

### (3) 運動機能障害者向けリハビリ支援装置<sup>7)</sup>

脳卒中後遺症などによる片麻痺や、脊髄損傷などによる全麻痺患者を対象に、VR 技術を利用した運動機能検査及びリハビリテーションを行うための上肢及び下肢用訓練評価システムであり、(財)みやぎ産業振興機構にて開発されたものである(図 4.3-7)。上肢用・下肢用運動機能障害検査、高次脳機能障害検査、上肢用・下肢用リハビリテーションが可能となっている。



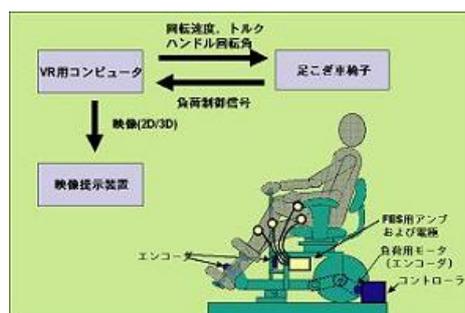
(a) 上肢用使用例



(b) 上肢用システム構成



(c) 下肢用使用例



(d) 下肢用システム構成

図 4.3-7 運動機能障害者向けリハビリ支援装置 ((文献 8)より引用)

上肢用は、視覚空間と体性感覚空間が融合したバーチャル空間を患者に与え、このバーチャル空間を患者の凝視点に応じてリアルタイムに変更できる。下肢用は、下肢運動機能障害者の足漕ぎ車椅子を利用した移動及び FES 駆動時のパラメーター調整を行うために、ペダルを漕ぐ動作の運動機能の定量的・客観的評価及び患者の興味維持と意欲向上を促すリハビリを支援する。

#### 4.3.1 おわりに

健康福祉機器・サービスは、経済産業省の新産業創造戦略<sup>9)</sup>において、戦略7分野の一つに挙げられている。それによると、現在の国民の最大関心事は健康であり、市場規模は、

2002年が約56兆円（内、医療用具2兆円、福祉用具1.2兆円、健康器具・健康用品0.3兆円）に対して、2010年には約75兆円（2002年に対して34%増）との見通しが立てられている。また、元気シニア立国を目指した健康サービス産業の総合的育成と、我が国の優れた製造技術を活かした医療・福祉機器の開発・普及というアクションプランも提言されている。

上述の市場規模は健康福祉機器・サービス全体のものであり、3次元情報を利用した機器・サービスに限定した場合の市場規模は不明である。しかしながら、アクションプランも明示された我が国の重点戦略分野として、今後の伸びが期待され、事業性も高いと推察される。例えば、本節で紹介した乗馬療法システムの家庭用健康機器「ジョーバ」は、ここ数年で、その効果が認知されることで飛躍的に販売が伸びている。このことから、本分野に対する国民の関心の高さを窺い知ることができる。また従来は、健康福祉機器・サービスにおける3次元情報や立体映像のインタラクティブ利用は、どちらかといえばモチベーションの維持・向上に用いられていたのに対して、本節で紹介したビジュアルトレーニングシステムのように、視力向上に立体映像を積極的に活用する事例も登場している。この他にも、近年、視力改善や脳の活性化を狙いとして、ランダムドットステレオグラムや3D画像を掲載した書籍<sup>10~14)</sup>が多数販売されている<sup>15)</sup>。これらは、これまで立体映像の人体への影響は、眼精疲労など、どちらかといえばネガティブに捉えられていたのに対して、全く逆にポジティブな影響を与えることができるという提案であり、興味深い。

3次元情報や立体映像、3D画像を健康維持・増進に積極的に活用する取り組みは、国民の最大関心事である健康という市場ニーズにマッチするものであり、今後の市場の伸びも期待できる。留意すべき点は、市場に対して、単に製品PRを先行させるのではなく、製品の効果をデータに基づいて科学的に十分に検証し、その検証結果を正しく、広く認知させることである。それが製造責任であり、本分野の事業の成功の鍵を握ると考えられる。

#### 参考文献

- 1) <http://vrsports.net/>
- 2) 澤田，野村：VR 技術を応用した健康機器の開発，日本バーチャルリアリティ学会学会誌，VOL.8，NO.2（2003）
- 3) <http://www.ep-s.jp/>
- 4) 柴田，河合他：高齢者を対象とした立体映像リハビリテーションシステムの開発と評価，日本バーチャルリアリティ学会論文誌，Vol. 6，No. 1（2001）
- 5) <http://www.tkawai.giti.waseda.ac.jp/>
- 6) 大須賀：高齢者の心身活性化をめざした VR，日本バーチャルリアリティ学会学会誌，

VOL.8, NO.2 (2003)

- 7) 吉澤, 田中他: バーチャルリアリティによる運動機能障害検査リハビリテーション・システム、第 42 回日本エム・イー学会大会 (2003)
- 8) [http://www.jst.go.jp/chiiki/create/tech\\_html/c-h10-miyagi/tech/ct-h10-miyagi-3.html](http://www.jst.go.jp/chiiki/create/tech_html/c-h10-miyagi/tech/ct-h10-miyagi-3.html)
- 9) [http://www.meti.go.jp/policy/economic\\_industrial/press/0005221/index.html](http://www.meti.go.jp/policy/economic_industrial/press/0005221/index.html)
- 10) 21 世紀の 3D アート眼力向上研究会, 栗田: 楽しんで遊んでみるみる目が良くなるマジック・アイ; 同 2, ワニブックス (2001; 2001)
- 11) 栗田: 3D 写真で目がどんどん良くなる本; 同水族館編; 同動物編; 同植物編, 三笠書房 (2001; 2002; 2004; 2005)
- 12) 中川: 5 分で目がよくなる 3D の不思議な眼の旅, 中経出版 (2003)
- 13) Hal, 黒瀬: 目が良くなるスペシャル 3D, 主婦の友社 (2003)
- 14) 栗田: 脳活性 3D トレーニングドリル, 学習研究社 (2005)
- 15) [http://www.yurindo.co.jp/info/ruisyo\\_list/ruisyo\\_3d.html](http://www.yurindo.co.jp/info/ruisyo_list/ruisyo_3d.html)

## 5 医療分野における 3次元画像利用の課題と展望

本調査では、各委員が、医療分野での 3次元画像利用に関わる、さまざまな取り組みについて述べた。その多くは、委員自身が携わったものであり、具体性の高い内容となっている。それらによって、医療分野での 3次元画像にかかる研究開発は、徐々に進みつつあることが示されたが、普及にあたっては多くの課題が存在することも明らかとなった。これらの課題は大きく、3次元画像の利便性と有効性という 2つのカテゴリに分けることができる。本稿では、各カテゴリにおける主な課題について整理し、今後の 3次元画像の利用を展望するための提言を行う。

### (1) 3次元画像の利便性にかかる課題

- ・ 高精度・高解像度の 3次元画像コンテンツを制作するには、関心領域を抽出するセグメンテーションやレンダリングなど、画像処理に時間を要すること。
- ・ 3次元画像の制作ソフトウェアは高価であり、また一般のユーザには使用が難しいものが多いこと。
- ・ 医療用 3次元画像の作成には専門的スキル・労力・時間を要するが、診療コストとしては認められていないこと。
- ・ 教育用、心理療法、健康増進などの分野で求められる 3次元画像コンテンツの機能や情報が異なる可能性があり、その効率的な制作手法などの知見は少なく、多大なコストを要すること。
- ・ 3次元画像を制作するためのデータ容量は非常に膨大であり、それらの保存・管理・転送は容易ではないこと。

### (2) 3次元画像の有効性にかかる課題

- ・ 3次元画像で得られる奥行き感には個人差が大きく、距離感の正確さなどが保証されないこと。
- ・ 医療分野で 3次元画像の研究開発ならびに試験的導入が行われているが、その大半は診断・治療における補助的な利用の段階にとどまっていること。
- ・ 3次元画像の多くは、2次元ディスプレイ上に表示されており、本格的な立体視の利用は少ないこと。
- ・ 裸眼式や高解像度の立体表示ディスプレイの開発は進んでいるが、利用実績が未だ乏しいこと。

- ・ 3次元画像の関連機能を付加した診断機器は、高価となることが多いこと。
- ・ 3次元画像を長時間、観察することにより、眼精疲労、乗り物酔い等の悪影響を生じる場合があること。

以上の課題を踏まえた上で、今後の医療分野における3次元画像の活用に必要な取り組みを、提言として以下に述べる。

- 利便性の観点では、特にコンテンツ制作の困難やコストに関する問題が、共通して指摘されていた。換言すれば、医療分野において「だれが、どのようにして、3次元画像を作成するのか？」という問いかけであり、これに対して合理的な解を見出すことが、重要である。すなわち、用途に応じて求められるクオリティを満たしたコンテンツの、制作手法・プロセスの体系化と、制作・呈示環境の低価格化やユーザビリティの向上が必要といえる。加えて、医療用の3次元画像に特化したクリエイターなど、新たなスキルを持った人材育成や職種の開拓も併せて求められる。
- 有効性とは、「3次元画像を使用して、何が、どの程度、良かったのか？」ということである。したがって、医学分野における用途において、3次元画像の有効性を示唆する事例やエビデンスを蓄積していくことが重要である。実際の治療場面や教育場面においては、統制された条件での有効性の比較・検証は困難であると考えられるが、奥行き知覚の精度だけでは有効性を主張するのに十分とはいえない。そのため、3次元画像の有効性にかかる、妥当かつ説得力のある評価方法の検討も行っていく必要がある。

## 第IV章 先端立体映像技術

1	はじめに	135
2	従来方式の問題点	136
3	空間像方式	138
4	各種実現方式	141
5	研究開発例の紹介（研究開発機関名称50音順）	153
6	アプリケーション展開	168
7	今後の研究開発	184
8	将来の展望	199

## 第Ⅳ章 先端立体映像技術

### 1 はじめに

本調査報告では、3次元映像のインタラクティブな応用分野として最も有望な医療分野と産業分野について調査した結果を、それぞれ第Ⅱ章と第Ⅲ章で詳細に報告している。しかし、これらの分野では、現状では2眼式の3次元ディスプレイの利用が主流である。さらに言えば、メガネ方式が一般的である。現状での装置コスト、関連技術に対する要求技術レベルの低さを考えると、古くから用いられている2眼式立体表示が現在でも使い続けられていることは仕方ないことかも知れない。しかしながら、メガネをかけることの煩わしさ、メガネなしの場合は目を規定位置に置かなくてはいけないこと、原理的に人間の立体知覚に矛盾するために生じる生理的な問題点など、本章2節で述べるような多くの問題点がある。これらが3次元ディスプレイの普及の障害になっていると言われていて、3次元ディスプレイの有効性が明らかな医療分野や産業分野でも3次元ディスプレイの利用がなかなか進まない理由であると言われている。

本章では、現在の2眼式や多眼式と置き換わることが期待されている最近開発された3次元表示方式について調査した結果について報告する。これらの方式では、いずれも、従来のような右眼用の画像と左眼用の画像を表示するという考え方ではなく、光線を直接制御して3次元像を表示するという考え方を採用することで、自然で臨場感の高い3次元表示を目指している。そのため、本調査報告では、これらの方式を総称して「空間像方式」と呼ぶことにした。本章では、3節と4節ではこれらの空間像方式の表示方式の原理について述べ、5節では具体的な表示装置の開発例についてまとめた。空間像方式の3次元ディスプレイは、医学分野、産業分野にとどまらず、さまざまな分野へ普及していくと期待されるので、その可能性について6節で述べた。また、実用化のために必要な要素技術の性能向上や低コスト化などについて7節でまとめた。最後に、8節で、要素技術の発展の予測をもとに空間像方式の発展について予測した。

現在の2眼式3次元表示に関しては、技術的にはかなり洗練されたものになっている。また、2次元表示では、ハイビジョン関連技術がこれから数年のうちに急激に熟成が進むと予想される。その後は、3次元映像へと技術開発が本格的に移行するものと考えられるが、現在のような2眼式や多眼式の3次元ディスプレイが家庭へ普及すると考えるのは難しい。それまでに、空間像方式の3次元ディスプレイの基礎技術の研究開発を進めておくことが重要であると考えられる。

## 2 従来方式の問題点

従来の2眼式、多眼式立体表示に関する問題点を表2-1に整理して示す。分類の仕方にも何通りかあるが、ここでは直接的問題点とその主たる原因の他、派生する問題点をまとめた。2眼式と多眼式について問題の大きさも付記した。

立体に見える視点が限られていることが第一に挙げられる。これは視差数が少ないことが主たる原因である。そのために観察者の位置や姿勢が制約される。また、視点を移動した場合に凹凸が反転する、いわゆる逆視領域がある。とくに2眼式ではこれらの問題は顕著であり、立体映像を正しく見るにはピンポイントの位置に観察眼を持ってくる必要がある。

さらに、なめらかな運動視差がないことも大きな問題である。すなわち観察者の移動に応じて立体映像を回り込んで見ることができない。2眼式では右目用画像と左眼用画像の二枚の画像しかないため、全く運動視差がない。また、多眼式でも視差間隔が眼間距離とほぼ同じであるため観察者が移動したときに画像の飛びが生じやすい。さらに視点が変化したときの質感も再現しにくい。光沢感は2眼式でも感じられるが、布生地などの質感を表現するのは困難である。

映像歪が大きいことも問題である。映像歪みの種類としていくつかあるが、いずれも見え方が不自然となり好ましくない。また、立体映像の絶対知覚ができないという問題も生じる。以下に映像歪の代表的なものを述べる<sup>1)</sup>。

### (1) 箱庭効果

立体画像の撮影条件と表示する条件の不整合から生じる現象で、立体にみえるはずの物が、箱庭に物を置いたように全体が小さく感じられる現象である。主な原因として、カメラの撮影倍率に対する再生時の表示倍率や視差間の不一致などがあげられる。

### (2) 書割効果

立体視した対象が平板のように感じられる現象で、まるで舞台に背景が並べられた書割のように見える現象である。主な原因は、まず①と同様の撮影時と再生時の条件の不一致があげられる。そして、奥行きのコントラストや空間周波数成分の非線形性や、運動視差が無いなど、両眼視差検出に関わる歪から生じるものと考えられている。

### (3) 額縁効果

ディスプレイ表示における特有の現象で、画面周辺に存在する画枠が画面の立体感を制限させてしまう現象である。つまり、立体感のある画像を表示しても、画枠近傍の立体表示物は、画枠の位置に引き込まれてしまい、立体感を失うものである。

### (4) 垂直方向の歪み

立体視において従来、垂直視差はあまり重要でないと思われていた。そのため垂直視差を付与しないことがあるが、この場合、垂直方向の頭部移動に対して対象が付いて来るかのように見える現象が生じる。さらに最近の両眼立体視の研究では、垂直視差が対象の視方向、距離、面の傾きと関係し、広視野において得に垂直視差が重要であることが指摘されている。

立体ディスプレイで良く問題とされるものに立体映像を観察する際の眼の焦点位置と輻輳位置の違いがある。焦点位置はディスプレイ面に合っているが、輻輳位置はディスプレイ面から離れた立体映像表示位置に合っている場合である。この「調節」と「輻輳」の不一致から視覚疲労を生じる可能性が指摘されている。視差数が少なく、視差間隔が広いことが主たる原因であると考えられる。

以上、従来方式における問題点について概観した。主にハードウェアの観点から述べたが、これらの問題の中にはコンテンツに起因するものもある。例えば、奥行き感の少ないコンテンツでは視差が少ないため、観察者が移動したときの映像飛びも少なく感じられる。このようにコンテンツ側で工夫することも考えられるがコンテンツに制約を与えないためにはより本質的な改善が求められる。

表 2-1 従来方式の問題点

直接的問題点	主たる原因	派生する問題点	従来各方式における問題の程度	
			2眼式	多眼式
視点が限られている	視差数が少ない	観察者に制約を与える。逆視領域がある	×	△
なめらかな運動視差がない	視差間隔が広い	映像飛びがある。質感の再現が困難	×	△
映像歪が大きい				
箱庭効果	撮影条件と観察条件が異なる	見え方が不自然。絶対位置が知覚できない	△	△
書割効果	撮影条件と観察条件が異なる			
額縁効果	画枠近傍での映像表示			
垂直方向の歪み	垂直視差がない			
輻輳と調節の不一致	視差数が少なく視差間隔が広い	視覚疲労を生じやすい	×	×

#### 参考文献

- 1) 「コンテンツの生体への影響に関する調査・研究」報告書，総務省報道資料，2004

### 3 空間像方式

従来のめがねなし 3次元表示では、2眼式では右眼用と左眼用の二つの視差画像を用意し、多眼式では3つ以上の視差画像を用意して、これらの画像を予め定めた視点位置に表示し、視点に眼を置くと観察できるように表示する。このように視点位置に正しく眼を置くことを前提として設計されるため、観察位置に対して大きな制約がある。

2眼式では調節と輻輳の矛盾による眼精疲労があることが知られているが、多眼式でも、右眼と左眼に異なる画像を表示するという点では2眼式と同じである。また、運動視差についても、視差画像数が数個程度では、不連続な画像の切り替わりが問題になる。

最近になり、視点を仮定するのではなく、光線の進行方向をサンプリングする3次元表示方式が提案されている。従来方式では、空間に設定した視点から見た視差画像を表示した。これに対して、光線の進行方向を角度でサンプリングし、指向性の高い平行光線で表示される指向性画像を表示する。光線の進行方向を制御することで、物体から発せられる光線を再現するため、「空間像方式」と呼ばれる。空間像方式では、観察者の視点位置を仮定しないため、観察位置に対する制約が少ない。ただし、レンチキュラーシート等を用いる薄型の構成では、繰り返し画像の発生があるため、水平方向への移動には制約がある。従来の多眼式表示と空間像方式の違いを図3-1に示した。

3次元像の生成において、視点を仮定しない場合に、従来の視差画像方式と区別するために、空間像あるいは光線再現という言葉が好んで使われる傾向がある。また、空間像の表示方式に関しても幾つかの方法が提案されている。しかし、重要なのは3次元表示に利用される光線密度である。考え方によっては、2眼式でも、視点に集まるように光線の進行方向を制御していると言うことができるからである。

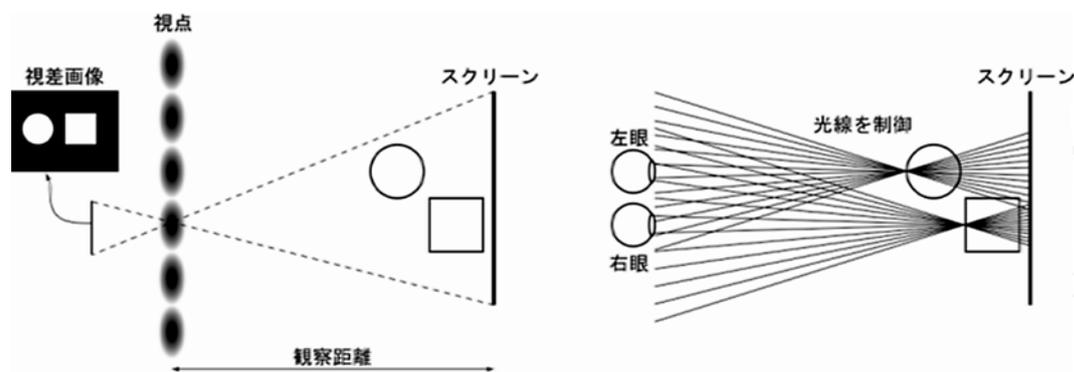


図 3-1 多眼式表示と空間像方式の比較

ここでは、空間像が人間に与える影響をもとに光線密度を二段階に分類する。第一段階では滑らかな網膜像形成が得られ、第二段階では調節と輻輳の矛盾が解決できる。

まず、第一段階について考える。指向性画像を平行光で指向性表示すると、眼には色々な方向からの光線が入射するため、多数の指向性画像の合成として網膜像が形成される。そのため、光線の進行方向のサンプリングピッチが小さいと、網膜像に不連続が生じる。図 3-2 に、測定結果の一例<sup>1)</sup>を示す（観察距離が 600 mm の結果）が、スクリーン面から 3 次元像までの距離が大きくなると指向性画像間の違いが増すから、網膜像の不連続性が大きくなる。この例では、光線のサンプリングピッチを  $0.68^\circ$  とすると、約 200 mm の奥行き表示が可能である。

第二段階は 3 次元像に対して眼のピント合わせが可能になる段階で、空間の一点を通る 2 本以上の光線を同時に瞳に入射させることで実現できると言われる。多眼式で、視点間隔を瞳径以下にする超多眼表示が提案されているが、これと同様な状態を作り出す。指向性表示で調節応答を測定した例<sup>2)</sup>を図 3-3 に示す。観察距離が 600 mm で、表示角度ピッチは  $0.34^\circ$  である。横軸には実視標に対する調節応答を取っている。単位ディオプタ [D] は距離 [m] の逆数である。

以上の結果から、大まかにではあるが、光線の表示角度ピッチと得られる効果について図 3-4 にまとめた。また、表示角度域を  $30^\circ$  とした場合の光線数も付記した。これは観察距離が 600 mm の場合の結果を参考にしたもので、超多眼の考え方からすると、観察距離が長くなると必要とされる角度ピッチは小さくなり光線数は増加することになる。ただし、調節輻輳矛盾が問題になるのは、観察距離が約 1~2 m 以内の場合であると言われている。

光線制御は水平と垂直の両方向に行うことが当然好ましいが、表示する光線数が二乗のオーダーで増加する。立体視において効果の大きい水平視差に限定した方が、より多くの光線数を実現できる。現状で、前者では  $21 \times 21$  の光線数を実現されている<sup>3)</sup>のに対して、後者では 128 の光線数を実現されている<sup>4)</sup>。ただし、垂直視差の放棄は、観察距離によって画像の縦横比が変化する問題を生じる。

究極の空間像方式はホログラフィーである。光線としてではなく波面として 3 次元像を表示する。コヒーレント光を用いるため、ボケの少ないシャープな 3 次元像を表示できる。ホログラム方式は第 IV 章 4.5 で述べるように、表示デバイスに対する要求が大きく実現が難しい。

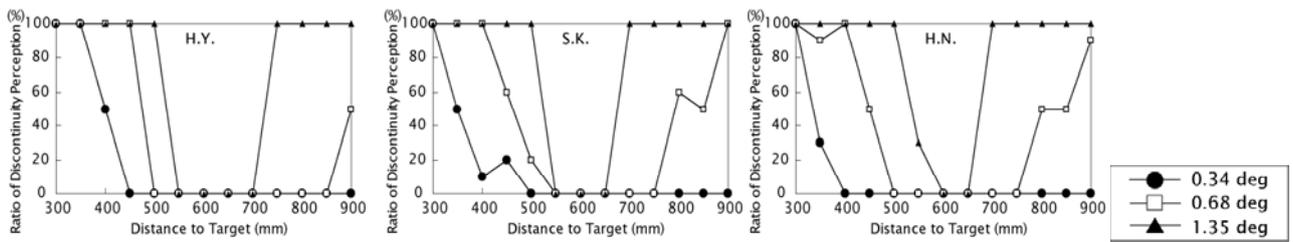


図 3-2 表示角度ピッチと網膜像の不連続知覚(観察距離 600 mm)

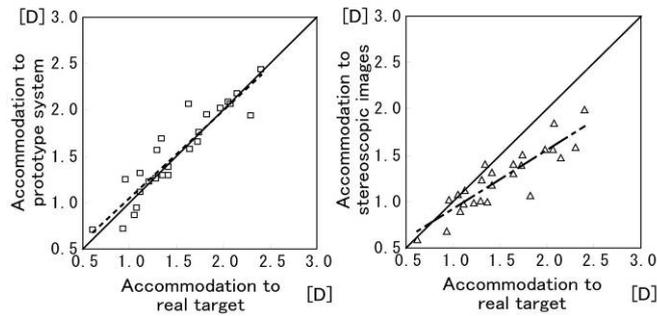


図 3-3 表示角度ピッチと調節応答 (左：高密度指向性 0.34°ピッチ、右：2 眼式、観察距離 600 mm)

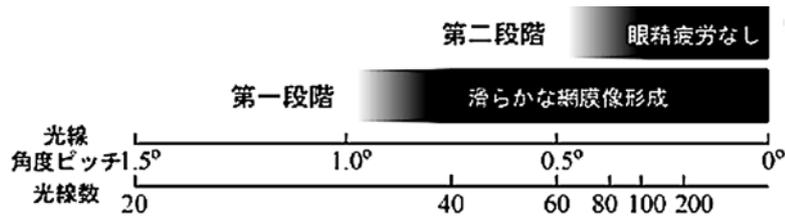


図 3-4 表示角度ピッチと空間像

参考文献

- 1) M. Watanabe et al., Proc. of IDW'04, p.1547-1550 (2004.12)
- 2) 高度立体動画像通信プロジェクト最終報告書、通信・放送機構 (1997.9)
- 3) 福富、他、映像情報メディア学会誌、vol.58 No.1 (2004.1)
- 4) T. Mishina, et al., Proc. of SPIE vol.5599, p. 114-122 (2004)
- 5) H. Nakanuma, et.al., Proc. SPIE vol.5664, p.28-35 (2005)

## 4 各種実現方式

### 4.1 インテグラルフォトグラフィ方式

#### 4.1.1 はじめに

インテグラルフォトグラフィ (Integral Photography、以下 IP) は、1908 年、M.G.Lippmann が提案した立体写真の一方式である<sup>1)</sup>。ホログラフィに先だって発明されたこの方式は、自由な視点から観察可能な空間像を形成できる方式として最初期の提案と見なすことができる。基礎的な原理実験は Lippmann 自身により行われているが、レンズアレイの製作には困難さを伴うことから、本格的な像再生実験は後の研究者により行われた<sup>2)</sup>。近年には立体テレビとしての実現性を探る検討・試作も行われてきている<sup>3~6)</sup>。

原理を図 4.1-1 により示す。オリジナルの方法ではレンズはロッド状のものが用いられている。被写体はここでは比較的遠い距離に置かれるものとし、そのためにレンズの焦点の位置に乾板が置かれる。各レンズの結像作用により被写体の小画像 (要素画像) 群が乾板上に記録される。この乾板を現像・定着し、背面から拡散光で照明して撮影時と同じ位置関係にあるレンズアレイを介して観察すると図に示すように立体像が再生される。各要素画像はレンズを通過後、一群の光線を構成し、これらは元の被写体位置で集束するため実物と同様な空間像が得られる。しかし、図から分かるように光線方向が逆となるため観察される立体像は奥行きが逆転した像である。奥行き正しい像を得るためには、IP に

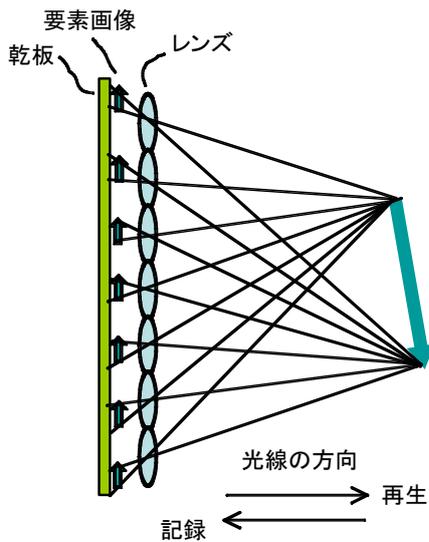


図 4.1-1 IP の原理

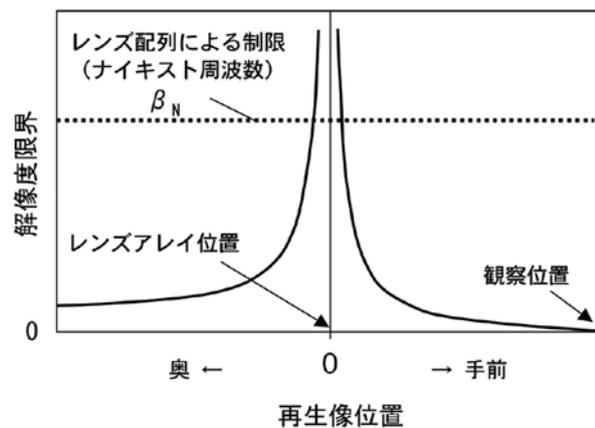


図 4.1-2 IP の解像度特性例

よる再生像を再度 IP の手法で撮影し再生すればよい。この手順は提案時にすでに示されているが、E. Ives が正しい奥行き再現の観点からより明示的に報告している<sup>7)</sup>。奥行き再現性に関する課題はこの後の多くの研究でも扱われている。

IP にはレンズ群とピンホール群を用いる方法があるが、2次元映像である要素画像群により光線群を捕捉・再生し、要素画像群の各々の投影像の集積により再生立体像を得る点では同一と見なすことができる。要素画像の撮影・表示には、一般に必ず解像度の制限を伴う（画素密度、レンズの MTF など）が、これによる再生立体像の解像度への影響は、再生像の奥行き位置に応じて変化する（図 4.1-2）。一方、再生像は最終的にはレンズの配列パターンによりサンプリングされるため、ここでも解像度の制限が生じる（図 4.1-2 の  $\beta_N$ ）。一般に表示面近くでは解像度が高く、そこから前後に遠ざかるにつれて低くなる。ピンホール方式は開孔が小さく回折の影響が大きい<sup>8)</sup>。またレンズ方式では上記の解像度特性に加えて、撮影・表示時のレンズのフォーカス位置による解像度の変化要素が生じる<sup>9)</sup>。

再生像の解像度を改善するためには、1要素画像あたりの画素数  $N$  と要素画像数  $M$  の両者を増やす必要があり、総画素数  $NM$  は増大する。また、観察視域を広げる場合も画素数の増加が必要となる。このため、視域を広げかつ再生立体像の解像度を十分に確保するためには非常に多くの画素数が必要とされることが示唆される。

IP という呼称は写真技法を示すことから、最近の電子ディスプレイなどの電子機器を用いた場合も総称して Integral imaging との呼称を用いることもある。IP の特徴を、被写体である 3次元物体からの光線情報を多数の 2次元映像群で補足・再生することと考えると、2次元ディスプレイと光学的なスクリーン（レンズアレイ、ピンホールアレイ）を用いる方法の多くは、IP と共通の基本原理に基づいていると考えることができる。IP の特徴のひとつに水平だけでなく全方向に視差変化が与えることが挙げられるが、垂直方向の視差変化を棄却し水平方向にのみ光線再現原理を適用したものもある。

#### 参考文献

- 1) M. G. Lippmann, Comptes-Rendus Academie des Sciences, **146**, pp. 446-451, 1908
- 2) 大越孝敬、「3次元画像工学」、朝倉出版（1991）
- 3) C.B.Burckhardt, J. Opt. Soc. Am., vol.58, No.1, pp.71-76 (1968)
- 4) 濱崎ほか、生産研究、Vol.40, No.3, pp.127-136 (1988)
- 5) M. McCormick, 3D-9, p.77-80, Proc. of International Display Workshop (IDW'95)(1995)
- 6) 洗井ほか、映情学誌 Vol.51, No.11, pp.1927-1934 (1997)
- 7) H. E. Ives, J. Opt. Soc. Am., Vol.21, No.3, pp.171-176 (March 1931)

- 8) H. Hoshino, et.al., Vol.15, No.8, J. Opt. Soc. Am. A, pp.2059-2065 (August 1998)  
9) 洗井ほか、映情学誌 Vol.55, No.5, pp.678-687(2001)

## 4.2 レンチキュラー方式

レンチキュラー方式は、フラットパネルディスプレイの表面に配置したレンチキュラーアレイ板によって光線の方向を制御することで立体視を実現する方式であり、比較的簡易に立体視ディスプレイを構成することができる<sup>1,2)</sup>。ディスプレイには LCD (Liquid Crystal Display, 液晶ディスプレイ) が用いられることが多い。

まず、レンチキュラー板の設計について述べる。2眼式および多眼式のレンチキュラー方式では、LCDのサブピクセルピッチ  $s$ 、ディスプレイと観察位置の距離  $D$ 、両眼間隔  $e$ 、液晶面とレンチキュラーの主点面の距離  $d$  について、以下の関係がある (図 4.2-1)。

$$D/e = d/s$$

このうち、両眼間隔  $e$  は、平均値 (約 65mm) が採用されることが多い。また、観察距離  $D$  は、用途に応じて決定される。さらに、解像度や価格帯から、用いる LCD が選択され、その画素ピッチによって  $s$  が決まる。これらから、液晶面とレンチキュラーの距離  $d$  が定まる。なお、両眼の間を更に細かく分割していくことで、空間像方式とすることができる。

液晶面とレンチキュラー間の距離  $d$  は、図 4.2-2 (左) のように一定位置に結像するように設定する場合と、図 4.2-2 (右) のように  $d$  をレンズの焦点距離  $f$  と一致させ、光線が平行光で射出されるようにする場合がある。2眼式や多眼式の場合には、前者、すなわち観察位置で結像するように  $d$  を設定すれば、LCD の非発光域 (ブラックマトリクス) のモアレを目立たなくすることができる。また、空間像方式の場合は、後者 (平行光) を用いると、奥行き方向の広い範囲において平等な見え方を確保することができる。

$n$  眼式の場合、レンチキュラーのピッチ  $l$  は画素ピッチ  $s$  の  $n$  倍となるが、液晶面とレンチキュラーの主点面は  $d$  だけ離れた位置にあるため、以下の式で補正を行う (図 4.2-3)。

$$l = ns \times D / (D + d)$$

なお、空間像方式の場合には、観察位置が一定でないことを光線密度数でカバーすることができるため、この補正をあえて行わない場合もある。

レンチキュラー方式が、パララックスバリア方式に対して有利な点として、明るさを挙げることができる。すなわち、画素を覆い隠すのではなく、光線を一定の方向に集める形で視差を持たせているため、光のロスが少なく、明るい画面を実現できる。また、指向性、すなわち光線の方向のコントロールがより精確にできる利点もある。特に空間像方式では、

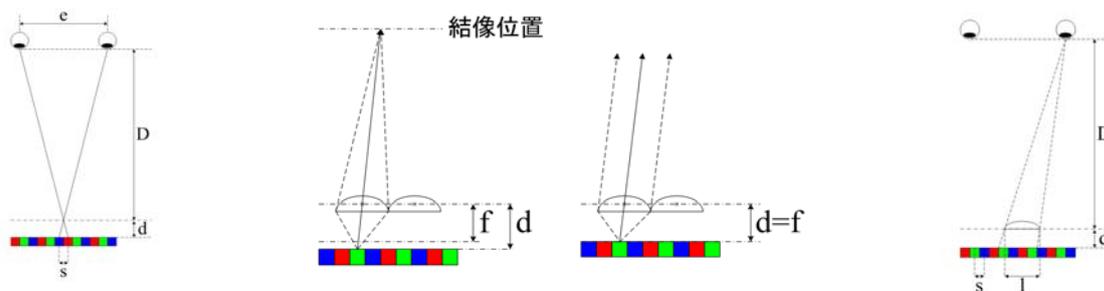


図 4.2-1 基本設計      図 4.2-2 ピクセルと視域の結像関係      図 4.2-3 ピッチ補正

射出光線を平行にする意味でも、光線のコントロールが重要であるが、このときパララックスバリアを用いたのでは、スリットをできるだけ細くしなければならず、その結果、画面がかなり暗くなってしまふとともに、光の回折の影響も無視できなくなる。しかし、レンチキュラー方式であれば、明るさを保ったまま、高いレベルで光線の指向性を制御することができる。

次に、レンチキュラー方式における課題について述べる。

パララックスバリア方式においても言えることであるが、3D 状態の表示を行うとレンズの効果により解像度が低下するため、2D の映像も本来の画質より低下してしまう。さらに、レンチキュラー方式の場合には、2D 表示時の画質を、レンチキュラー非装着時の状態に近づけることは、パララックスバリアの場合よりも技術的に困難である。そのため、解決法も技巧的なものが多い。詳しくは第IV章 7.6 で述べるが、代表的なものとしては、

(1) レンズ浮上方式：2D 表示時に、レンチキュラーと液晶面の距離を、焦点距離の 2 倍とする、(2) アクティブ・レンチキュラー・レンズ方式：レンズ領域を液晶で構成し、屈折率を変化させることで切り替える、(3) 2 重レンズ方式：2 枚のレンズの凹凸面を対向させた状態を 3D 表示用に設計し、2D 表示時には凹凸が互い違いになるように移動させる、といったものが挙げられる。なお、最近では、3D 表示時においても高い画質が求められる傾向が強く、超高解像度の LCD を用いることで、3D/2D の両状態において高い画質を実現すること（いわゆる「切り替えない」方式）も有力な選択肢の一つとなっている。

レンチキュラーの製造についても第IV章 7.6 で述べるが、大きな問題点としては、ピッチや焦点距離の製造誤差や、製造後の経年・環境変化による変形が挙げられる。特にピッチ誤差の影響が重大である。そのため、樹脂よりも熱膨張率の小さいガラスの上に、レンチキュラーを盛るように製造する等の対策が考えられている。

他の問題としては、LCD の非発光域がレンズによって拡大され、適視位置以外の場所で黒い縞模様（モアレ）となって目障りとなることがある。これを軽減する方法としては、

(1) レンチキュラーを画素配列に対して斜めに配置し、モアレを画面全体に拡散させる、

(2) 液晶面とレンチキュラー間の距離を設計値の前後で意図的にずらし、像全体が少しぼやけた様に調整する、(3) 液晶面とレンチキュラーの間に拡散板を挟み、液晶面からの光がレンチキュラーに到達する前に拡散させて非発光部を隠す、といったものがある。

レンチキュラー方式のこれまでの代表的な実施例を、表 4.2-1 に挙げる。空間像方式の各実施例については、第IV章 5.2, 5.3, および 5.5 にて詳しく述べる。

表 4.2-1

2眼式	IBM (10.4 インチ VGA) <sup>3)</sup> 、NEC (二重レンズ方式による 3D/2D 切り替え)、NEC (超高解像度 LCD (2.5 インチ、水平 470ppi×垂直 235ppi) による「切り替えない」方式)、その他
多眼式	ステレオグラフィックス (9 眼、20~40 インチの大画面)、フィリップス (5 または 7 眼、アクティブ・レンチキュラー・レンズ方式による 3D/2D 切り替え)、ナムコ (4 または 5 眼、レンズ浮上式による 3D/2D 切り替え) <sup>4)</sup> 、その他
空間像方式	高密度指向性表示 (東京農工大学)、1 次元インテグラルイメージング方式 (東芝)、フラクショナル・ビュー方式 (ナムコ)、その他

#### 参考文献

- 1) 大越：3次元画像工学 (改訂版)、朝倉書店、pp.19-21,58-59 (1991)
- 2) 宮沢、田村、大淵：3次元映像のテクノロジー、情報処理、38-3、pp182-188 (1997)
- 3) 宮沢：レンチキュラ板の標本化効果を考慮した 3次元画像処理アルゴリズム、3D映像、10-4、pp.19-24 (1996)
- 4) 石井、宮沢：平面表示との両立が可能な立体視ディスプレイとその性能評価、3次元画像コンファレンス 2002 論文集、pp.65-68

### 4.3 パララックスバリア方式

パララックスバリア方式はもっとも古い裸眼立体表示方式である。原理は図 4.3-1 のように写真等の 2次元の表示デバイスの手前に縦スリットが入った遮光板 (パララックスバリアと呼ばれる) をおき、これを通して観察する。細いスリットを通して写真上のどの部分が見えるかは眼の位置によって異なるため、これに合わせた縞状の画像を用意することで右目と左目に別々の画像を見せることができる。はじめに 2眼式のパララックスステレオグラムが発明され、後に開口比を下げることによって多眼式を実現した (パララックスパノラマグラム)<sup>1)</sup>。3次元表示の基本的な原理はレンチキュラー方式と同等であるが、構造が単純なため安価で製造が容易、レンズを使わないので収差がないといった長所がある。

また、光を透過する部分と遮る部分を設けるといって極めて単純な構成であるため、他の技術と組み合わせてさまざまに発展する可能性を秘めているといえる。例えばパララックスバリアを液晶で構成し可変とすることや、色フィルタ・偏光フィルタ等の機能を組み合わせることなどが提案されている。一方で短所としては光量の減少、バリアが目障りな点が挙げられる。また、指向性を高めようとする場合はスリット幅を狭くする必要があるが、狭くしすぎると光の回折現象の影響が出るため指向性に限界があるという問題がある。以下にパララックスバリア方式を基に発展した最近の技術を紹介する。

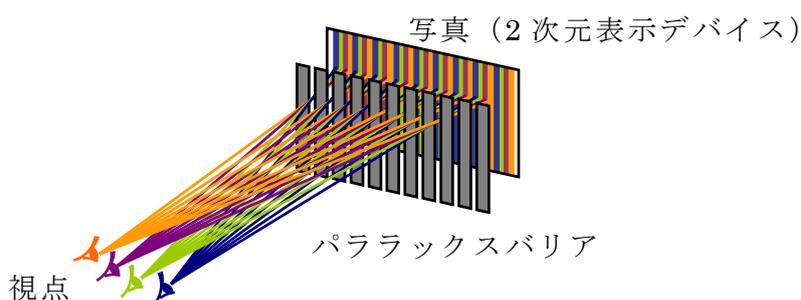


図 4.3-1 パララックスバリア方式の原理

#### (1) 液晶パララックスバリア

パララックスバリアを液晶で構成し、可変とする提案が NHK からなされている<sup>2)</sup>。2D/3D 表示の切り替えや、視点追従方式<sup>3)</sup>、スリット走査による時分割方式<sup>4)</sup>などに応用されている。

#### (2) スリット走査方式

2次元 LED アレイによる高速表示パネルと強誘電性液晶による高速のパララックスバリアを用いて時分割で表示を行う方式が MR システム研究所から提案されている<sup>4)</sup>。また TAO からは円筒形状のパララックスバリアを機械的に回転させることによって走査し、2次元表示デバイスの代わりに縦1次元の LED アレイを回転させる方式が提案されている。これについては第IV章 5.4 項を参照されたい。これらの走査方式の持つ特長の一つとして、上述の回折現象による指向性の限界を回避できる可能性が挙げられる。

#### (3) スリット状光源方式

表示デバイスの前にパララックスバリアをおく代わりに、液晶等の透過型表示デバイスを用い、そのバックライトをスリット状とすることによってパララックスバリアと同等の効果を得ようとするものである<sup>5)</sup>。光の利用効率が高い点が特長である。

#### (4) 点光源アレイ方式

上記スリット状バックライトの代わりに点光源アレイを用い、水平・垂直両方向の視差を実現したものである<sup>6)</sup>。

#### (5) 斜めバリア(ステップバリア)方式<sup>7)</sup>

通常の縦ストライプのパララックスバリアでは、解像度の低下が水平方向のみに生じるため垂直・水平解像度のアンバランスが問題となることがあるが、パララックスバリアを斜めの階段状にすることによって解像度の低下を縦と横に分散させる方法が提案されている。ちょうどレンチキュラー板を斜めにするのと同等の効果がある。

#### (6) 波長選択性パララックスバリア<sup>8)</sup>・偏光パララックスバリア方式<sup>9)</sup>

通常のパララックスバリアでは画像はスリット部分のみを透過して見え、遮蔽部分には何も見えない。つまり画面全体に対して画像が見える部分の割合は小さく空間的な効率が低いため、見かけの解像度が低いなどの問題が生じる。これに対し、完全な遮蔽物体の代わりに波長選択フィルタや偏光板を用いてパララックスバリアを構成することによって空間的な効率を高める手法が提案されている。

#### 参考文献

- 1) 大越、3次元画像工学、pp.11-12, 朝倉書店
- 2) 泉監修、NHK放送技術研究所編、3次元映像の基礎、pp.146-148
- 3) K. Perlin et al., Proc. SIGGRAPH2000, pp.19-326(2000)
- 4) 須藤他、3次元画像コンファレンス 2000 論文集、pp.95-98(2000)
- 5) 坂田他、3次元画像コンファレンス 95 論文集、pp.48-53(1995)
- 6) 尾西他、3次元画像コンファレンス 2001 論文集、pp.173-176(2001)
- 7) <http://www.sanyo.co.jp/koho/hypertext4/0209news-j/0910-1.html>
- 8) <http://www.opticalitycorporation.com/>
- 9) 阪本他、映像情報メディア学会誌 Vol.59, No.2, pp.296-301(2005)

#### 4.4 プロジェクション方式

空間像方式の実現に、多眼式表示で用いられるプロジェクション型を用いることができる。従来からある代表的なプロジェクション型の構成方法を図 4.4-1 に示すが、水平方向に並べた複数のプロジェクターと一方向指向性スクリーンで構成される<sup>1)</sup>。一台のプロジェクターで一眼分の画像を表示する。一方向指向性スクリーンは、水平方向には光線を来た方向へ反射し、垂直方向には光線を拡散する。そのため、プロジェクターと同じ水平位置に眼を置くと、そのプロジェクターで表示した画像が観察される。プロジェクターの間隔を両眼間隔に等しくすると、左右の眼に異なる画像を表示することが可能になる。

一方向指向性スクリーンは、図 4.4-2 に示すように、レンチキュラーシートと拡散板で構成される。拡散板はレンチキュラーシートの焦点面に配置されるため、レンチキュラーシートのシリンドリカルレンズが並ぶ方向にはレンズ効果により再帰反射性を示し、これと直交方向にはレンズ効果がないため拡散性を示す。

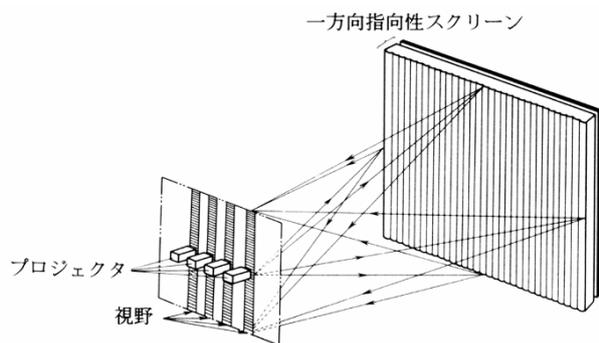


図 4.4-1 プロジェクション型 3次元表示

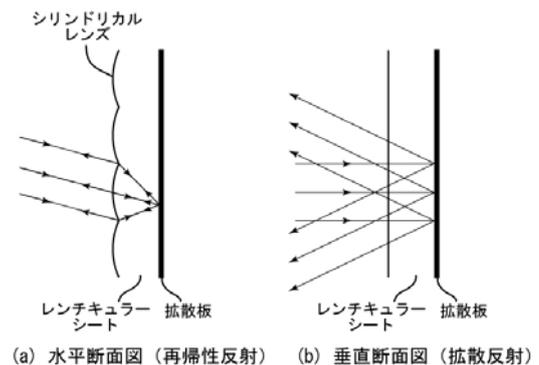


図 4.4-2 一方向指向性スクリーン

以下に、最近開発されたプロジェクション型 3次元ディスプレイの例を示す。

##### (1) 時分割表示

ケンブリッジ大学で提案された方式<sup>2)</sup>で、図 4.4-3 に示すように、高フレームレートな表示デバイスを用い途中に高速なシャッターアレイを設置する。シャッターアレイと観察者の瞳位置は結像関係にある。シャッターと同期させて画像を高速に切り替えて表示することで、観察者の瞳面上水平方向に多数の視点を作り出す。比較的単純な構成で実現できるが、高フレームレートな表示デバイスが必要であり、光の利用効率が低い。

## (2) FAPO 方式

TAO（旧通信放送機構）で超多眼を実現するために用いられたシステムで図 4.4-4 に示すように、複数のプロジェクション光学系を扇形に配置する。FAPO（Fan-like Array of Projection Optics）方式と名づけられている<sup>3)</sup>。表示面が凹面鏡になっていて、その結像作用により複数のプロジェクション光学系の投影レンズの瞳を空間に複数結像することで多数の視点を発生する。視点数と同じ数だけのデバイスを用いるため個々のデバイスに要求される性能は低い、多数のデバイスを用いるためサイズが大きくなる。

## (3) 高密度指向性表示方式

空間像方式である高密度指向性表示を実現するために東京農工大学で提案されたシステムである<sup>4)</sup>。図 4.4-5 に示すように、複数のプロジェクション光学系を水平位置が一致しないように変形 2 次元配置する。スクリーンを垂直方向拡散板とすることで、垂直表示方向に違いを解消し、すべての画像を異なる水平方向へ表示する。光学系を 2 次元配置するため、多数の光学系をコンパクトに配置することができる。この構成で、実際に 64 指向性<sup>4)</sup>、128 指向性システム<sup>5)</sup>が試作されている。

## (4) Transpost

全周表示型の Transpost と名付けられたシステムが日立から提案されている<sup>6)</sup>。構成図を図 4.4-6 に示すが、これもプロジェクション型に分類することができる。下部に設置したプロジェクターで、多数の画像を円周上に並べた画像を表示する。これらの画像は、天板の鏡で反射され、周りに設置された多数のミラーで反射され、中心部の回転スクリーンに向けて異なる水平方向から表示される。回転スクリーンは再帰性反射スクリーンになっていて、水平方向に多数の画像が表示される。

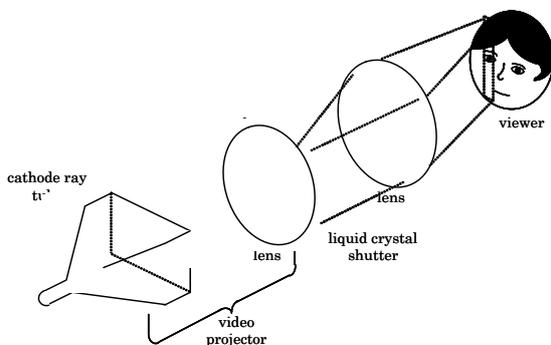


図 4.4-3 時分割表示方式<sup>2)</sup>

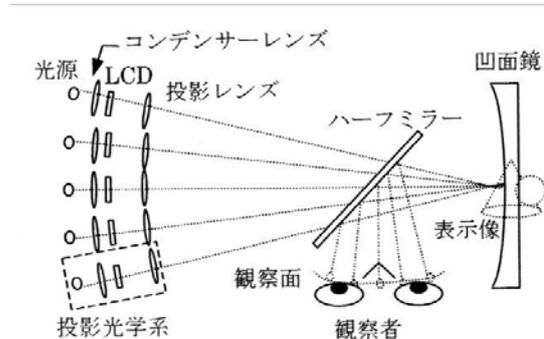


図 4.4-4 FAPO 方式<sup>3)</sup>

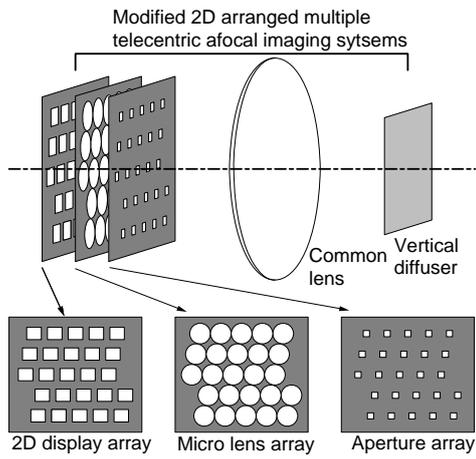


図 4.4-5 高密度指向性表示<sup>4,5)</sup>

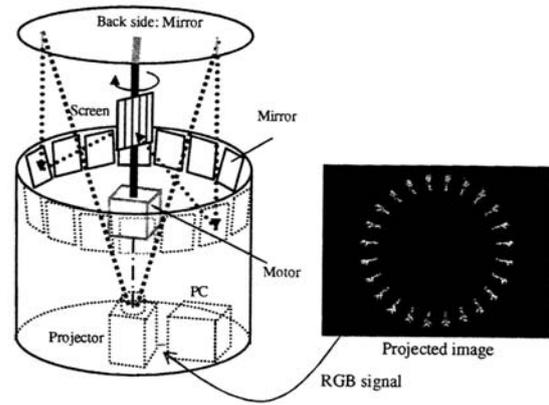


図 4.4-6 Transpost<sup>6)</sup>

#### 参考文献

- 1) 大越孝敬、3次元画像工学、5章、朝倉書店
- 2) A. R. L. Travis, Proc. IEEE, vol. **85**, pp. 1817-1832, (1997.11)
- 3) 高度3次元動画像遠隔表示プロジェクト最終報告書、通信・放送機構 (2002.9)
- 4) 高木：映像情報メディア学会誌、vol.**57** no.2, p.293-300 (2002.2)
- 5) H. Nakanuma, et.al., Proc. SPIE vol.**5664**, p.28-35 (2005)
- 6) R. Otsuka, et. al., Proc.SPIE vol.**5599**, p.56-63 (2004)

#### 4.5 ホログラフィー方式

前節までの空間像方式は、多数の指向性画像からの光線を空間に再現することにより、輻輳と調節の不一致のない自然な3次元知覚を実現する方式である(図4.5-1)。しかし、人間の眼に入射する離散的な光線の数に観察条件に依存し、単眼に複数の光線が入射する超多眼条件<sup>1,2)</sup>の下でしか調節が機能しないという制限がある。したがって、光線の再現による空間像は、物理現象と生理現象が複合してはじめて知覚されるものであり、物理的な実在としての像とは異なると考えられる。

ホログラフィー方式は、実際の物体が発する光と等価な電磁場を再現する方式である<sup>3)</sup>(図4.5-2)。すなわち、物体が発する散乱光の強度と位相の情報を含む干渉縞(ホログラム)に対するコヒーレントな照明光の回折現象を利用することにより、奥行き異なる空間の各点に歪のない像を無収差で結像させることができる。このため、自然視の場合と同様な3次元知覚が観察条件に依らず実現されることになる。ホログラフィー方式は、2次

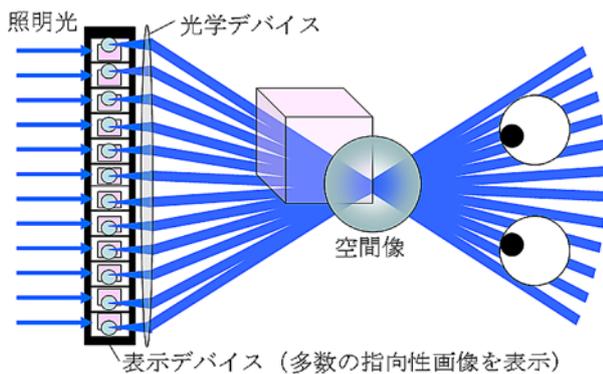


図 4.5-1 光線を再現する方式

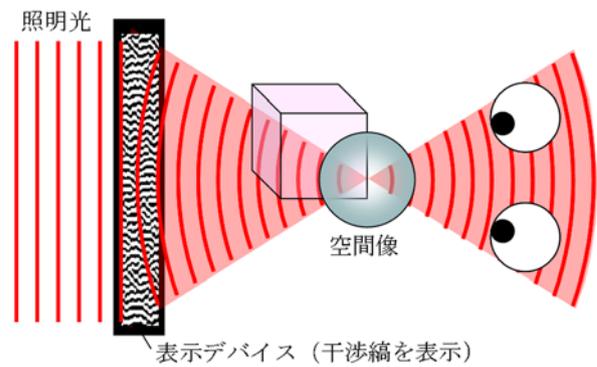


図 4.5-2 ホログラフィー方式

元物体（干渉縞）から物理的な像（実像または虚像）としての 3 次元画像を形成させることができる唯一の方式であり、究極の 3 次元表示方式とされている。

ホログラフィー方式は、光の波長程度（ $1\mu\text{m}$  以下）の間隔の干渉縞を表示できる表示デバイスにコヒーレント光を照射するだけで原理的には実現できる。すなわち、表示デバイス上の干渉縞自体が結像作用をもつため、第IV章 4.1～4.4 の各方式のような特別な光学系は本来不要である。しかし、実際には実用化されている電子的な表示デバイスの画素サイズが  $10\mu\text{m}$  程度であることから回折角が小さく、視域が狭いという課題がある。そこで、画素サイズを実効的に小さくするための光学系が必要となるが、このような光学系は同時に画像全体のサイズをも縮小してしまう。このため、実用的な視域と画像サイズを得るためには、高分解能と高画素数を兼ね備えた表示デバイスが必要となる。

実際の研究開発事例としては、液晶パネルを用いる方法<sup>5,6)</sup>（第IV章 5.1.2 参照）と音響光学素子（AOM）を用いる方法が代表例であり、両者は本報告書の前身である「平成 16 年度立体映像表示に関する調査研究報告書」に詳しく解説されている<sup>4)</sup>。

ところで、ホログラフィー方式というよりは光線を再現する方式あるいは多眼式に近いものとして、視差を含む画像からの光をホログラフィー光学素子で制御する方式がある<sup>3)</sup>。

例えば、画素を複数の回折格子で分割したパーシャルピクセル方式<sup>7)</sup>のうち、IC ビジョンは LSI 表面に液晶セルを装着したものであるが、回折格子を電氣的に形成している点でホログラフィー方式とホログラフィー光学素子方式の中間に位置すると分類されている<sup>3)</sup>。

また、液晶素子の各画素に曲線格子を装着したグレーティングイメージ方式<sup>8)</sup>やホログラフィー光学素子を用いた実時間ステレオグラム<sup>9)</sup>がある。

さらに、光線を再現する方式により近い事例として、Holografika 社が開発した HoloVizio がある<sup>10)</sup>（図 4.5-3）。これは、解像度 QVGA の LCD を 96 個用いて、26 型のホログラフィックスクリーンにマルチプロジェクションすることにより、水平視差のみで

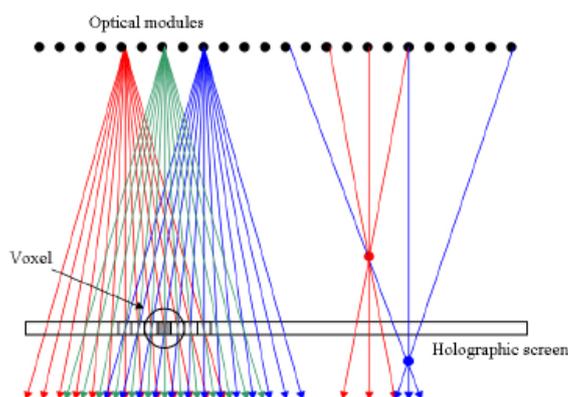


図 4.5-3 HoloVizio の光学系<sup>10)</sup>

視差数 60、角度刻み 0.8 度、視域 50 度を実現したものである。

最後に、コヒーレント結像により波面を再現する純粋なホログラフィー方式と、ホログラフィー光学素子を用いた方式とでは像形成に関して本質的な違いがあるにもかかわらず、両者には密接な関係がある。AOM 方式の電子ホログラフィーの研究過程から超多眼の概念が誕生したように<sup>1)</sup>、両者は相互に影響を及ぼしながら発展していくと予想される。

#### 参考文献

- 1) 高度立体動画像通信プロジェクト最終成果報告書 通信・放送機構 (1997)
- 2) 高度 3 次元動画像遠隔表示プロジェクト最終報告書 通信・放送機構 (2002)
- 3) 辻内順平 ホログラフィー 裳華房 (1997) p192-210
- 4) 吉川 浩：平成 16 年度立体映像表示に関する調査研究報告書, p.34-39 (2005)
- 5) 三科智之, 奥井誠人, 土井敬一郎, 岡野文男, HODIC Circular, 22, 1, pp.19-24 (2002)
- 6) K. Maeno et. al, Proc. of SPIE, **2652**, p.15-22(1996)、および特許第 3731039 号
- 7) J.H.Kulick et. al, J.Opt. Soc. Am. **A12**, p.73-83 (1995)
- 8) S. Toda, S. Takahashi, F. Iwata, Proc. of SPIE, **2652**, p.54-61 (1996)
- 9) K.Sakamoto, H. Ueda, H.Takahashi, E.Shimizu, Proc. of SPIE, **2577**, 22-32 (1995)
- 10) T. Balogh et. al, EUROGRAPHICS 2005, Dublin, Aug.2005

## 5 研究開発例の紹介

ここでは、空間像方式の具体的な研究開発例を紹介する。国内における代表的な空間像方式である。それぞれ特徴をもった方式であり、独自の用語が用いられているため、ここでは「4 各種実現方式」との関連をもとに表に整理した。

なお、以下に続く研究開発例の紹介の順番は、研究開発機関名称の 50 音順とした。

表 研究開発事例と表示方式

表示方式	視差	研究開発事例
インテグラル フォトグラフィー方式	水平・垂直	5.1 インテグラル立体テレビ (NHK) 5.6 インテグラル表示システム(日本ビクター)
レンチキュラー方式	水平	5.2 高密度指向性表示 (東京農工大学) 5.3 1次元インテグラルイメージング方式 (東芝) 5.5 フラクショナル・ビュー方式 (ナムコ)
パララックスバリア方式	水平	5.4 Seelinder (名古屋大学)
プロジェクション方式	水平	5.2 高密度指向性表示 (東京農工大学)
ホログラフィー方式	水平・垂直	5.1 電子ホログラフィー (NHK)

### 5.1 インテグラル立体テレビと電子ホログラフィ (NHK)

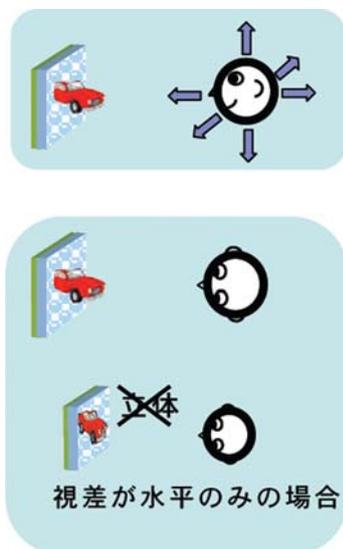
NHK では、空間像再生型の立体映像システムとして IP 方式に基づくインテグラル立体テレビおよび電子ホログラフィの研究を通じ次世代の立体テレビの実現性を探っている。

#### 5.1.1 インテグラル立体テレビ

インテグラルフォトグラフィ (以下 IP、第IV章 4.1 節参照) は、要素画像と呼ばれる小画像群を介して、被写体からの光線を 2次元画像として記録・再現する方式と見なすことができる。観察位置を変えた場合、被写体間の見え隠れやパースペクティブなどの像変化が実物と同様に再現される特徴がある。また、水平だけでなく垂直を含めた全方向に視差が再現されるため (フルパララックス) 頭を傾けてみても立体視できる (図 5.1-1)。ホログラフィではコヒーレント光が必要となるが、これに対し通常の照明を使用できる点も特徴である。

NHK では IP の原理に基づく方式として、撮像側に屈折率分布レンズのアレイを用いリアルタイム撮像、表示が可能なインテグラル立体テレビを試作している (図 5.1-2)<sup>1)</sup>。屈

折率分布レンズは半径方向に屈折率が変化する特性を持つファイバーレンズで、入射した光線は一定周期でファイバー内を蛇行する。この周期の 3/4 の長さの時に結像作用を持ち、凸レンズでは倒立像となる場合に正立像が得られる。この性質により、奥行き反転



どの方向に動いても自然な見え方

寝転んで見てもOK

視差が水平のみの場合

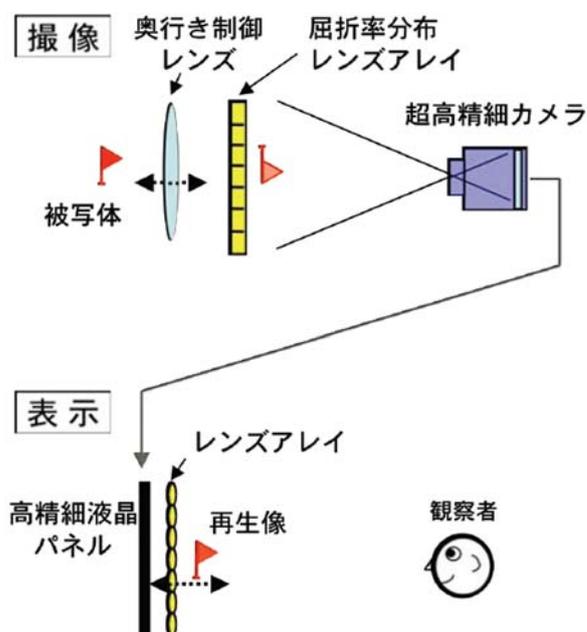


図 5.1-1 全方向への視差再現

図 5.1-2 インテグラル立体テレビの基本構成

(第IV章 4.1 節参照) を回避することができ、その結果、撮影した映像を直接表示することが容易となり、リアルタイムの撮像・表示システムが構成しやすい。図中にある奥行き制御レンズは、被写体の奥行き位置を制御しレンズアレイ付近に実像を形成することで解像度を確保するとともに、奥行き方向の表示画面からの飛び出しなどを制御する。

IP 方式では、視域の広さと立体再生像の解像度をともに改善するためには、ベースとなる映像システムは非常に高い解像度を有する必要がある。インテグラル立体テレビの当初の試作装置はハイビジョンカメラ (1035 (V) × 1920 (H) 画素) を用い、レンズ数は 54 (V) × 63 (H) であった。その後、走査線が 2000 本相当 (2160 (V) × 3840 (H) 画素) の超高精細動画像を撮影できるカメラと改良したレンズアレイ (レンズ数 118 (V) × 160 (H)) を用いることにより高性能化した試作装置を開発し<sup>2)</sup> (図 5.1-3, 5.1-4)、研究所の一般公開などで展示している。図 5.1-4 に撮影した映像の垂直方向の視差の様子を示す。

この装置は当初の装置に比べ、解像度が縦横とも約 2 倍となりよりきめの細かい立体画像を表現できる。しかし、現行のテレビと比べると解像度は数分の 1 相当に留まり、また視域も狭いため実用のためには充分でない。主要課題は解像度の向上であるが、他の画質

要因の分析・検討も進めている<sup>3)</sup>。



図 5.1-3 超高精細映像による試作装置



図 5.1-4 再生像の例(垂直視差の再現)

### 5.1.2 電子ホログラフィ

ホログラフィは物体から発せられる光の波面そのものを再生できるため、理想的な立体像再生方式と考えられている。記録・再生されるべき干渉縞は非常に細かいパターンとなるため、電子的なデバイスによってこれを取得・表示することは現時点ではかなり高いハードルであり、実用化には技術的なブレークスルーが必要と考えられる。

ホログラフィの像再生は、ホログラム製作時の参照光に対応する光線を照明することにより行う。このとき、再生の対象となる光学像以外に照明光が直接透過する直接光、再生像とペアで生じる共役像が同時に生成される。現在の電子的な表示デバイスでは解像力が十分でないため、結果として共役像が再生像と重なって見え妨害となる上、視域が狭く両眼での観察が困難となる。NHK では、共役像を効果的に除去し、また独自手法により視域を広げた装置を試作し<sup>4)</sup>、一般公開で展示している。この装置では両眼で観察可能な立体像を得ている。

#### 参考文献

- 1) F. Okano, et. al, Opt. Eng. 38(6) 1072-1077 (June 1999)
- 2) J. Arai, et. al, vol. 5006, Proc. of SPIE 49-57 (2003)
- 3) M. Okui et al, Applied Optics Vol. 44, Issue 21, pp.4475-4483 (2005)
- 4) 三科ほか、NHK 技研 R&D No.93, p14-19 (Sep., 2005)

## 5.2 高密度指向性表示（東京農工大学）

自然な 3 次元表示方式として高密度指向性表示が東京農工大学から提案されている。これは第 IV 章 3 で述べた空間像表示方式で第二段階の自然な 3 次元表示を目指したものである。

表示角度ピッチ  $0.2^{\circ}\sim 0.4^{\circ}$  で 50~100 個の指向性画像を高密度に表示すると、調節と輻輳の矛盾が問題になる 1~2 m 以内の観察距離で、3 次元像に対する調節が機能するようになる<sup>1)</sup>。すなわち、図 5.2-2 (a) に示すように、3 次元像の一点を通る光線が 2 本以上同時に瞳に入射するようになる。また、指向性画像は準平行光で指向性表示されるため、同図 (b) に示すように指向性画像のうち瞳に入射するのは画像の一部であり、多数の指向性画像の部分画像の合成として網膜像が形成される。眼の位置が変化すると、画像が瞳で切り取られる位置が変化するので、表示画像の解像度と同じくらい滑らかな運動視差が得られる。

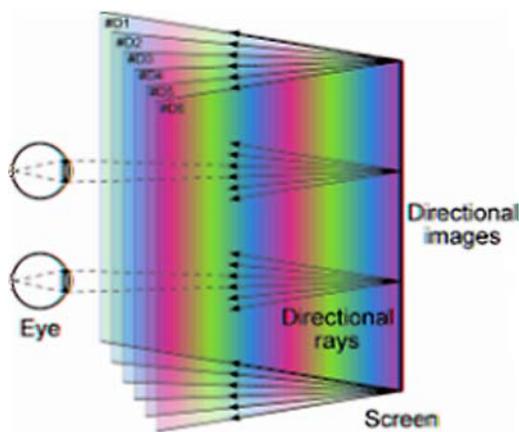


図 5.2-1 高密度指向性表示

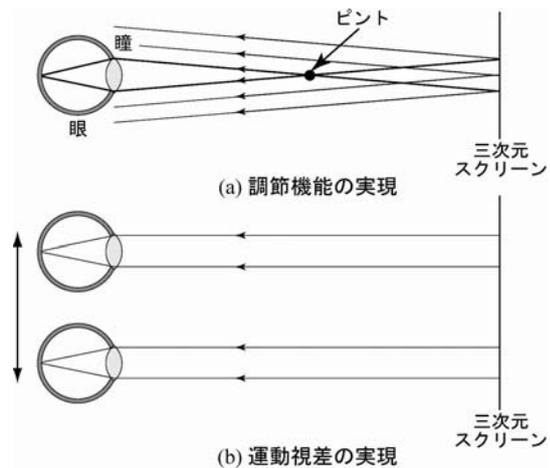


図 5.2-2 自然な 3 次元表示

高密度指向性表示では、多数の光線で多数の画像を表示する必要があるため、変形 2 次元配置を基本とした独自の構成が用いられる。これには、図 5.2-3 に示すプロジェクション型と図 5.2-4 に示す薄型の 2 種類の構成方法がある<sup>2)</sup>。いずれの場合も、縦横に表示素子や光学素子を 2 次元配置して、これらをすべて水平方向の表示へ振り向けることで、水平方向に高密度表示を実現する。

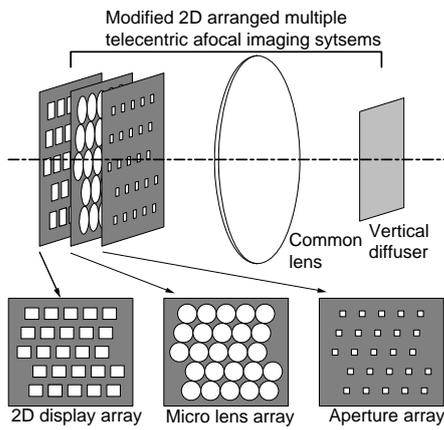


図 5.2-3 プロジェクション型構成方法

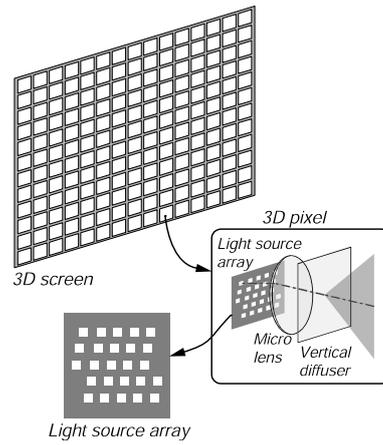


図 5.2-4 薄型構成方法

高密度指向性ディスプレイとして表 5.2-1 に示す 4 種類のディスプレイが既に試作されている。30 指向性ディスプレイは、モバイル用に試作したもので、通常のディスプレイに比べて観察距離が短いため指向性数を 30 と少なくしている。高密度指向性ディスプレイで生成した 3 次元像の例を図 5.2-5 に示す。3 次元像をスクリーン手前に表示でき、また、3 次元像の奥行き絶対位置が知覚できるため、3 次元像を手の上に載せることもできる。

表 5.2-1 プロトタイプ高密度指向性ディスプレイ

指向性光線数	64 指向性 <sup>2)</sup>	128 指向性 <sup>3)</sup>	72 指向性 <sup>4)</sup>	30 指向性 <sup>5)</sup>
構成方法	プロジェクション型		薄型	
水平表示角度ピッチ	0.34°	0.23°	0.38°	0.71°
水平視域角	21.6°	29.6°	27.6°	21.2°
3 次元解像度	~QVGA	~QVGA	320×400	256×128
スクリーンサイズ	9.25"	13.2"	22.2"	7.2"
外観				

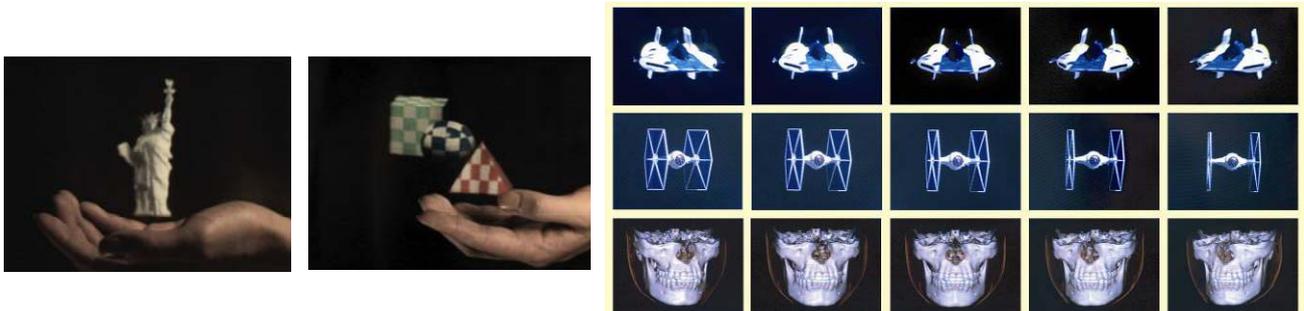


図 5.2-5 高密度指向性表示による 3 次元像

高密度指向性ディスプレイは、光線の進行方向を詳細に制御できるため、物質表面の反射や屈折まで再現することができる<sup>6)</sup>。そのため、物質のもつ光沢感や透明感といった質感を表現することができる。2次元ディスプレイでは、ディスプレイ表面で光線が拡散するため、厳密には、このような質感を正確に再現することはできない。

#### 参考文献

- 1) 福富、他：映像情報メディア学会誌、vol.58 no.1, p.69-74 (2004.1)
- 2) 高木：映像情報メディア学会誌、vol.57 no.2, p.293-300 (2002.2)
- 3) H.Nakanuma, et al., Proc. SPIE, vol.5664, p.28-35 (2005)
- 4) Y.Takaki, Proc. SPIE, vol.5664, 56-63 (2005)
- 5) 堀越、他、3次元画像コンファレンス 2005 論文集、p.45-48 (2005)
- 6) Y.Takaki, et al., Proc of IDW, p.1777-1780 (2005)

### 5.3 1次元インテグラルイメージング方式（東芝）

東芝では自然で見やすく視覚疲労が少ないといった人間に優しい立体映像を目指し、ハードウェアからソフトウェアまでトータルで開発している。また、見せ方の工夫により今までにない効果的な立体映像表現ができないか検討している。

#### 5.3.1 方式概要

1次元インテグラルイメージング方式は第IV章 4.1 に述べられている垂直方向の視差を放棄し水平方向のみに光線再生原理を適用したインテグラルフォトグラフィーに他ならない。

従来の多眼式は約 65mm 間隔の両眼位置にレンズの主光線が集まるような設計になっている。これに対し、本方式ではレンズの主光線どうしがほぼ平行となっている。また光線の角度間隔はより密である。このように観察者の眼の位置を特定しないため多少前後左右に動いても滑らかに立体映像が変化して見える。

#### 5.3.2 技術的特長

インテグラルイメージング方式は理想的方式ではあるものの精細度が低く<sup>1)</sup>、正常に立体映像が見える範囲すなわち視域が十分広くないなどの問題があった。これらの課題を解

決するために (1) モザイクカラーフィルター配列による水平解像度の劣化低減と 3D 解像度の上下左右の対称性改善<sup>2)</sup>、(2) 視域最大化アルゴリズム<sup>3)</sup>、(3) 歪みの少ない立体映像表現<sup>4)</sup>などの技術を開発している。これらの技術により自然で見やすい立体映像表現を可能にした。さらにコンテンツ開発や 3D 用パターン画像を作成するためのソフトウェアも開発している。

### 5.3.3 平置き型への適用

赤青眼鏡を使用するアナグリフ方式を用いた平置き型の立体視により、そこにあるかのようなリアルな立体表現ができることが知られている<sup>6)</sup>。平行光線 1-D II 方式は比較的広い視域を有しており、このような平置き型ディスプレイとの整合性が高い。観察者の体格の違いなどにより見る場所が異なるため広い視域を確保する必要があるからである。

今回、平行光線 1-D II 方式を平置きシステムに応用した<sup>5)</sup>。コンテンツ作成のためのツールは従来の縦置き型に加え平置き型にも対応するよう拡張している。オーサリングツールにより多数の視差画像を準備すると 3D ミドルウェアが自動的に特殊フォーマット画像に変換する。この画像を 3D ディスプレイに入力することで立体視が可能である。

本平置きシステムでは見る方向に応じた映像がリアルに体感できる。実物との位置関係も自然に把握できる。視差数は 12 あるいは 16 とした。水平画素数は 480、視域角は 30 度である。コンテンツとしてゲームやレストランメニューなどを作成している。後者は実写画像である。

また、立体映像と実物体との同時鑑賞を実現した。本 3D 方式は擬似的な 3D ではなく、実物体があると仮定してその物体が放つ反射光を間引いて再生する方式であるため、このような表現が可能である。図 5.3-1 の上図は平置き型 3D ディスプレイを左方から観察したもの、下図は右方から観察したものである。右下の缶のみ本物で、他の缶は 3D 映像であるが、見る位置に応じて缶と缶との重なり具合が自然に変化していることがわかる。図 5.3-2 は本物の透明アクリル筒を水槽に見立て、立体映像の金魚を立体映像の水の中で泳がせている。左下の金魚は立体映像であるため水槽の外で泳がせるなど実際には有り得ない表現もできる。このようにハードウェアやソフトウェアの性能向上に加え、見せ方も工夫することで新たな感動が得られるようになった。

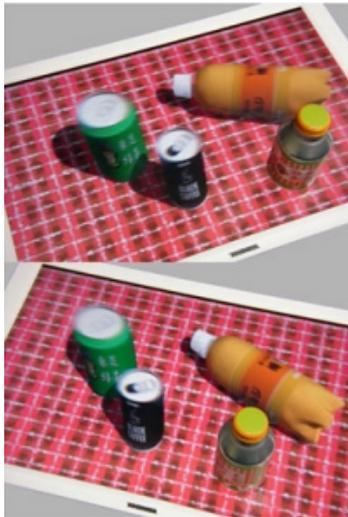


図 5.3-1 3D 映像と実物の缶



図 5.3-2 3D 映像と実物の筒

#### 5.3.4 生体影響の評価結果

光トポグラフィーによる脳血流の変化、自律神経系による脈波の変化、さらに唾液によるコルチゾール・クロモグラニン A による変化の結果から、実験に用いた立体映像の視聴に関しては、立体感は一般的な 2 眼方式より得易く、ストレスや疲労感は通常の 2 次元映像並みであるという結果を得ている<sup>7)</sup>。主観評価である SSQ の結果からも同様の結果が確認されている。さらに継続評価中である。

#### 5.3.5 応用展開

今後さらに精細度を高め、視域を拡大することが主な課題である。これらの課題を解決することでさらに効果的な立体映像表現が可能になるものと期待される。そこにあるかのようなリアルな立体映像表現が可能な平置き型立体ディスプレイは今後その特長を生かして様々な分野で使われていくものと期待される。ゲームのほか、教育分野も有望である。広告、設計の分野にも適合性が高く有用な使われ方がされていくであろう。

また同一の平置き型立体ディスプレイを複数人で取り囲みインタラクティブな操作が出来るようにすることで人と人とのコミュニケーションを促す新しい立体映像メディアとして使用される可能性もある。

## 参考文献

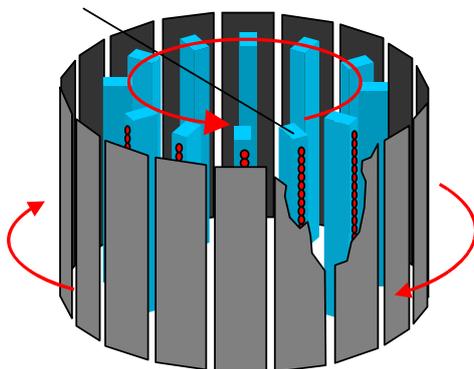
- 1) H. Hoshino, et al., “Analysis of Resolution Limitation of Integral Photography,” J. Opt. Soc. Am. A15, pp. 2059-2065, 1998.
- 2) K. Taira, et al., “Autostereoscopic Liquid Crystal Display Using Mosaic Color Pixel Arrangement,” Proceedings of SPIE 5664, pp. 349-359, 2005.
- 3) R. Fukushima, et al., “Novel Viewing Zone Control Method for Computer Generated Integral 3-D Imaging,” Proceedings of SPIE 5291, pp. 81-92, 2004.
- 4) T. Saishu, et al., “Distortion Control in a One-Dimensional Integral Imaging Autostereoscopic Display System with Parallel Optical Beam Groups,” SID 04 Digest, pp. 1438-1441, 2004.
- 5) Y. Hirayama, et al.: “Flatbed-type Autostereoscopic Display Systems Using Integral Imaging Method,” Digest of Technical Papers International Conference on Consumer Electronics (ICCE), pp. 125-126, 2006.
- 6) T. Wilson, “A Phantogram Retrospective,” Stereo Views 11, pp. 1, 6-8, 2004.
- 7) 総務省委託研究 ネットワーク・ヒューマン・インタフェースの総合的な研究開発（映像が生体に与える悪影響を防止する技術） 平成 15～17 年度研究概要 シンポジウム資料集, 2006

## 5.4 Seelinder（名古屋大学）

空間像方式の特長の一つは、視位置に応じて適切な画像が観察されることにより、自然な運動視差がもたらされることである。これを一言で言うならば、3次元像を様々な方向から眺められ、かつ自然に見えるということである。しかしながらディスプレイの形状が平面では、裏側にまで回りこんで見ることはできない。この意味において究極のディスプレイ形態は、球のような閉曲面であろう。その表面から外向きに飛散する光線を全て再現すれば、閉曲面内部に表示した3次元像を完全に自由な方向から眺められる。これに近いものとして”Seelinder”と呼ばれる円筒型の3次元ディスプレイが提案されている。その構成は図5.4-1に示すように高速に輝度を制御可能な1次元LEDアレイを円筒面上に複数配置した光源部分と、その外側にある円筒パララックスバリアからなり、LEDアレイ部分は比較的低速で、円筒パララックスバリアは比較的高速で互いに逆方向に回転する。LEDアレイからの光はスリットを通して細い光束となって外に射出され、その射出方向は光源とスリットの相対位置の変化によって水平方向に走査される。これに同期してLEDアレ

この輝度を制御することによって方向毎に異なる輝度の表示を時分割で行うことができる。これにより被写体から飛来する光線の状態を円筒面上で再現することが可能となり、360度全周方向から立体像を見ることができる円筒形の3次元ディスプレイを構成できる。試作機の仕様を表5.4-1、表示画像の例を図5.4-2に示す。また、パララックスバリアには第IV章4.3項で述べられているように回折現象に起因する指向性の限界があるため、解像度と指向性がトレードオフとなることが知られているが、本方式はスリットを走査することによってパララックスバリアの開口幅とピッチを狭めることなく解像度を高めることに成功しており、その結果高い指向性を実現しているという特長がある。

1次元LEDアレイ（低速回転）



円筒パララックスバリア（高速回転）

図5.4-1 Seelinderの構造

表5.4-1 試作機の仕様

	モノクロ試作機(2000)	カラー試作機(2002-2004)
画素数	1254 (水平1周) × 128 (垂直)	1254 (水平1周) × 256 (垂直)
画素ピッチ	水平 0.5mm 垂直 1mm	水平・垂直 1mm
表示面サイズ (円筒)	直径 200 × 高さ 128mm	直径 400 × 高さ 256mm
水平視域角	360度	360度
各画素ごとの視域角	60度	60度
光線角度ピッチ	< 1度	< 1度
立体像サイズ (円柱状)	直径 100 × 高さ 128mm	直径 200 × 高さ 256mm
表示色	単色 2値	12bit カラー
リフレッシュレート	30Hz	30Hz
外観		



図 5.4-2 表示画像（上：モノクロ・CG、下：カラー・実写）

#### 参考文献

- 1) 圓道他、電子情報通信学会論文誌 Vol.J84-D-II, No.6, pp.1003-1011(2001)
- 2) 圓道他、映像情報メディア学会誌 Vol.59, No.10, pp.1506-1509(2005)

### 5.5 フラクショナル・ビュー方式（ナムコ）

フラクショナル・ビュー方式は、(株)ナムコから提案されている、フラットパネルディスプレイ（主に LCD）とレンチキュラーを用いた立体視表示方式であり、第IV章3で述べた空間像表示方式の自然な3次元表示を、比較的簡易なハードウェアを使用しながら、ソフトウェアによる光線計算の精確さを追求することで、目指したものである<sup>1,2)</sup>。

フラクショナル・ビュー方式の構造上における、他方式との最大の違いは、光線をいくつかの視点や方向に整えることをせず、光線の方向がなるべくまばらで均一となるようにしていることである。これは、LCDの画素ピッチとレンチキュラーのピッチを合わない（整数比でない）ようにした上で、光線の方向を精確に計算することで実現される。ピッチを合わせる必要がないため、製造誤差の問題が解決されるとともに、より自由な組み合わせが可能となり、高い汎用性を持っている。また、レンチキュラーをLCDの画素配列に対して斜めに配置することで、光線の方向が一層まばらとなり、画質を上げることができるが、この配置角度も自由に設定できる。

フラクショナル・ビュー方式で描画を行うには、まず、LCDとレンチキュラーの組み合わせに応じて、画素毎に光線の射出方向を精確に計算する（図5.5-1）。そして、その方向に合わせた描画を行うことで、空間像を形成する（図5.5-2）。光線の射出方向を計算するには、レンチキュラーのピッチ $l$ や配置角度 $\theta$ （図5.5-3）をできるだけ精確に知ることが必

要であるが、インタラクティブに変化するテストパターンを用いて調整を行うことで、これらのパラメータを取得できるようにしている。

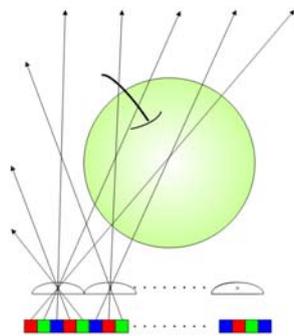


図 5.5-1 光線設定

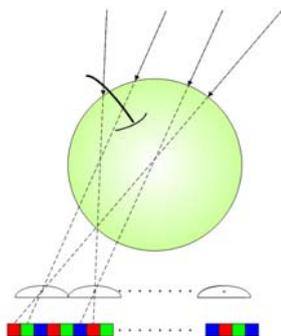


図 5.5-2 描画

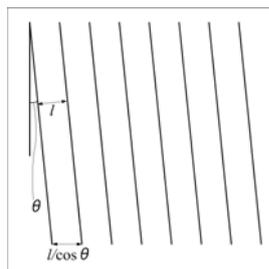


図 5.5-3 配置

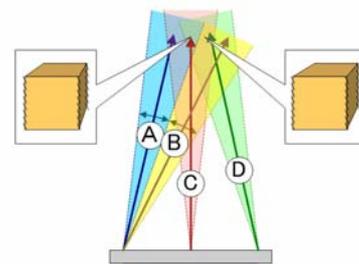


図 5.5-4 画質

次に画質について述べる。フラクショナル・ビュー方式においては、観察視点の近傍を通過する光線が多数集まって、1つのビュー（1視点から見たイメージ）を構成している。例えば、図 5.5-4 の左の枠で示した視点位置においては、A,C,D の光線がビューの形成に寄与している。その近傍にある右の枠で示した視点位置においては、C,D はそのままだが、A に代わって B がビューの形成に寄与するようになる。このように、視点付近を通過する光線だけが組み合わさってビューが形成される。結果として、互いに近傍の視点による2つのビューは、かなりの情報量を共有していることとなるが、これにより、解像度の低下を抑えつつ、ビューの数が膨大に増えたかのような効果を生み出すことができる。（ただし、各光線は観察視点を正確に通過するものではないため、多少正確さを欠く画像となる。）

フラクショナル・ビュー方式は、使用するフラットパネルディスプレイやレンチキュラーが専用設計である必要がないため、非常に高い汎用性を持っている。印刷物用に大量生産されているレンチキュラー（例えば、ピッチが 10, 15, 20, 30,...と 10 または 15LPI（Line/Inch）刻みで製造されている）を用途に応じて使い分けることができる。また、射出光線の方法は、組み立て後の調整・計算によって求めるので、製造誤差をも吸収できる。さらには、温度変化や経年変化によるレンチキュラーのピッチ誤差に対しても、ソフトウェア的な再調整だけで対応することができる。

以上により、大画面、高精細、平置き等、様々な形態のディスプレイに、容易に対応させることができる。試作例を表に示す。なお、3次元表示における、LCD の原解像度からの解像度低下は指向性光線数（レンチキュラー1ピッチあたりに含まれるサブピクセル数）によるとし、それが縦横に均等に割り振られると仮定して、次の式により試算した。

$$3 \text{次元解像度（縦・横）} = \text{原解像度（縦・横）} / \sqrt{\text{指向性光線数}}$$

表 5.5-1 フラクショナル・ビュー方式立体視ディスプレイの試作例

使用 LCD	表示域サイズ	17 インチ	15 インチ	33 インチ
	原解像度	1280×1024	2048×1536	1280×1024
	サブピクセルピッチ : s	96.2 ppi×3	171.6 ppi×3	49.4 ppi×3
使用レンチ キュラー	ピッチ : l	40 lpi	40 lpi	20 lpi
	焦点距離 : f	2.0mm	2.0mm	3.0mm
	水平視野角	18°	18°	24°
	配置角度 : $\theta$	15°	15°	15°
3次元表示	指向性光線数 : s/l	7.22	12.87	7.41
	3次元解像度	476×381	570×428	470×376
	備考	標準的な LCD	高精細	大画面

最後に、本方式の応用分野として、アーケードゲーム（業務用ゲーム機）を例に挙げて説明する。3次元空間内のモデルを描画したという意味での（平面視の）3DCG（3 Dimensional Computer Graphics）技術は、既に、ゲーム等のコンテンツ制作を支える基本的なテクノロジーとなっているが、それをさらに越えるような、革新的な映像表現技術として、立体視映像技術が期待されている。アーケードゲームにおいては、30～50インチ程度の大画面であっても、VGA（640×480）以下の解像度である場合が少なくないため、立体視表示による解像度の低下を考慮に入れても、比較的安価なハードウェアで構成が可能である。もちろん、予算や描画速度に余裕があれば、フラットパネルディスプレイの解像度を上げることで、より高品質な立体視を実現することもできる。本方式は、コスト、解像度、描画速度等の要求に、フレキシブルに対応することができるため、幅広いコンテンツに応用できると期待される。

#### 参考文献

- 1) 石井：フラクショナル・ビュー・ディスプレイ—非整数ビューの立体視—、3次元画像コンファレンス 2004 論文集、pp.65-68
- 2) 石井、宮沢：フラクショナル・ビュー方式立体視—光線計算による汎用的かつ高品質な立体視ディスプレイ—、月刊ディスプレイ 2005 年 5 月号、pp.70-75

#### 5.6 インテグラル表示システム（日本ビクター）

日本ビクターでは、撮像系と信号処理系と表示系からなるシステムとして、空間像方式の総合的な研究開発が行われている。この3次元映像システムは、被写体とカメラの間の

距離画像（デプスマップ）と 2 次元画像をリアルタイムに取得可能なデプスカメラと、デプスマップを用いて仮想的な多数の視差画像を生成する信号処理アルゴリズムと、これらの視差画像を空間像として表示する 3 次元ディスプレイから構成される（図 5.6-1）<sup>1)</sup>。

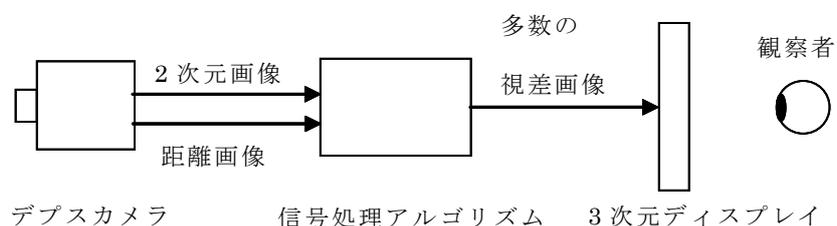


図 5.6-1 3次元映像システムの概略図

デプスカメラはイスラエルの 3DV Systems 社と日本ビクターが共同開発したものである<sup>2~4)</sup>。変調した赤外光（レーザー光）を被写体に照射し、反射する赤外光と可視光を光学的に分離して赤外光のタイミングを被写体の部位毎に検波することにより、被写体を 1 方向から撮影した 2 次元画像（可視光画像）と距離画像（赤外光画像）を同時に撮像する。

信号処理アルゴリズムは、これらの画像から仮想的な多数の視差画像を生成する。奥の物体の一部が手前の物体に隠れる現象（オクルージョン）による画像の欠損を補償している。光沢感などの質感表現力に課題があるが、情報量が劇的に少ないという利点をもつ。

3 次元ディスプレイは、IP（Integral Photography）の原理に基づき、直視型または投射型の表示デバイスを用いた 2 種類の実験機を試作している（表 5.6-1、図 5.6-2）。

表 5.6-1 3次元ディスプレイの仕様

	直視型	投射型
表示デバイス	22.2 型 TFT-LCD (IDTech 製)	0.7 型 D-ILA 3 板式(JVC 製)
画面サイズ (対角)	22.2 型	8.6 型 (on screen)
RGB 画素数	3840×2400	1400×1050
画素間隔	0.1245mm	0.1245mm (on screen)
光学デバイス	レンズアレイ	拡散スクリーン + レンズアレイ
レンズ数 (解像度)	384×240	140×105
レンズ間隔	1.245mm × 1.245mm	
視差数	10×10	
角度刻み	0.8×0.8 deg.	
視域角	8×8 deg.	

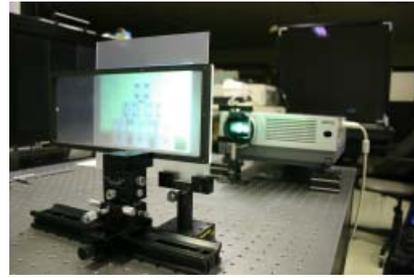
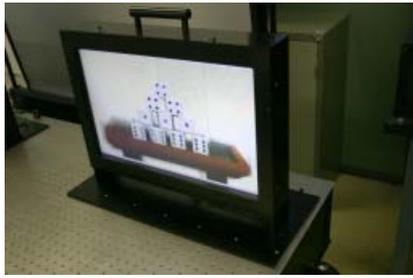


図 5.6-2 3次元ディスプレイの外観：直視型（左）および投射型（右）

投射型の表示デバイスである D-ILA (Direct-drive Image Light Amplifier) は、日本ビクターが独自に開発した LCOS (Liquid Crystal on Silicon) 構造をもつ反射型液晶表示素子の一種である。高い開口率と高密度化を両立させることができるため、スーパーハイビジョンに応用されるなど<sup>5)</sup>、高い解像度を実現するポテンシャルをもつ。

直視型と投射型では空間像を形成する光線の性質に違いがある。すなわち、直視型では表示デバイスの構造に起因するモアレを避けるために収束光線または発散光線として射出するのに対し、投射型では平行光線として射出する。図 5.6-3 にデプスカメラで撮影した実写動画像を投射型ディスプレイに表示させた例を示す。本実験システムの限られた視域内ではデプスマップ特有の違和感が生じることがなく、レンズアレイの前後の奥行き表示範囲にバランスのとれたクリアな空間像を知覚できることが確認された。

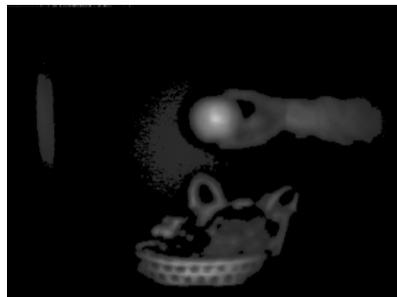


図 5.6-3 デプスカメラで撮像した 2次元画像（左）、デプスマップ（中）、空間像（右）

#### 参考文献

- 1) K. Suehiro, H. Nakamura, K. Yamada, S. Nakamura, T. Sugahara, Proc. of SPIE vol. **5664**, p.230-240 (2005)
- 2) G.J. Iddan, G. Yahav, Proc. of SPIE vol. **4298**, p.48-55 (2001)
- 3) 河野景三, 小林 学, 特許第 3726699 号
- 4) [http://pro.jvc.com/prof/Attributes/tech\\_desc.jsp?model\\_id=MDL101309&feature\\_id=02](http://pro.jvc.com/prof/Attributes/tech_desc.jsp?model_id=MDL101309&feature_id=02)
- 5) <http://www.jvc-victor.co.jp/press/2005/aichi-expo.html>

## 6 アプリケーション展開

### 6.1 産業応用

#### 6.1.1 空間像方式のメリット

産業応用に於いても空間像方式には様々なメリットがあると考えられる。眼鏡なしであることは作業効率を上げるのに役立つ。これは産業応用においては空間像と生産や検査を行う実物体とを交互に見比べる必要性が高いからである。頻繁に眼鏡を着脱することは効率を下げるばかりか、ミスも起こしやすくなる。

また絶対位置が知覚できることも重要である。例えば実空間においてこれから製造する製品のディメンションを空間像により正確に体感して把握することができる。また部品の組み付け具合を空間像によりチェックする場合には、検査者の移動に応じて物体の側面が回り込んで見えるといった運動視差があることも有用である。

さらに眼に優しい空間像方式では長時間作業でも視覚疲労が少なく安全・安心な職場環境構築にも寄与する。

#### 6.1.2 各種産業応用

設計・製造分野に於いては3次元CADによるデータを空間像表示することが考えられる。入り組んだ配管などを立体視することで前後関係が容易に把握できる。また設計した部品の組み付け具合をチェックするのも空間像は有効である。部品間の空隙の具合などを確かめることが出来るからである。さらには仕上がりの見栄えを実際に作製する前に確かめることも可能である。従って短期間での製品開発につながる。

検査分野に於いては例えば超音波診断による製品の非破壊検査時に空間像を使用できる。例えば金属内部の亀裂や空洞をチェックすることが行われている。立体視しなくても検査データの画像処理により欠陥部を見つけることは出来るが、最終的には実際に人間が眼で見てチェックすることが重要と考えられておりこの場合、空間像を用いることができる。

制御分野では例えばプラント制御室や運行制御室で空間像が用いられる可能性がある。プラント制御室の場合、監視カメラによる現場の配管を実写表示することにより異常事態が生じたときに破損箇所などを把握しやすくなる。また、制御モニターを空間像にすることでプラントの運転状況を一瞥して把握することも出来ると考えられる。運行制御室では電車や飛行機の運行状況

を空間像により表示できる。この場合、特に平置き型で表示することも有効であると予想される。導入効果としては視認しやすくなる上、咄嗟の判断も正確に行えるものと期待される。

その他として、設計・生産に関わる作業者の研修、実習、OJT など育成教材としても利用されていくものと思われる。

### 6.1.3 技術課題

産業応用に於ける最大の技術課題の一つは如何に大きな空間像を再生するかということである。これは実寸表示が求められる場合が多く、かつ自動車のエンジンのように大きな部品を扱うことが求められるからである。大きな空間像を実現するためには方式にもよるが一般には大画面のディスプレイが必要となる。数十インチ級の大型パネルも普及しつつあるが、大型の光線制御素子も作成する技術が要求されるようになる。さらにパネルサイズと同等の十分な奥行き再現量を達成する必要がある。このためには出来るだけ多くの視差光線を用いる必要があり、ハイビジョンを超える画素数の多いディスプレイの開発が必要となろう。また、広い範囲から回り込んで空間像を観察できることも重要となる。様々な角度からチェックしたり、複数人で観察できるためである。このためにはさらに使用するパネルの画素数を増やし、視差光線数を増やすことが要求される。

### 6.1.4 市場規模

CAD/CAM/CAE 関連市場の大きさは 2004 年度で約 3300 億円と見込まれている。このうち 10%を 3次元ディスプレイ市場として見積もると、330 億円である。当該分野に於いて空間像は設計時間短縮や生産性向上に寄与すること大であり、潜在需要は大きいと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 平成 16 年度 立体映像表示に関する調査研究報告書、(社) 日本機械工業連合会、(社) 日本オプトメカトロニクス協会

## 6.2 医療応用

3次元ディスプレイの重要な応用分野に医療応用がある。現在の 3次元ディスプレイの医療応用については、第Ⅲ章で詳しく述べられている。将来の 3次元表示方式である空間

像方式が実用化されれば、医療のさらなる高度化が可能になることが期待できる。

空間像方式の 3 次元ディスプレイを用いて医用 3 次元表示システムを実現すると、従来の 2 眼式立体表示方式などの 3 次元ディスプレイにはない以下のような特長が得られる。

(1) 3 次元観察のたびに特殊な眼鏡を装着する必要がない、(2) 奥行き絶対位置が知覚できるため患部の位置が正確に特定できる、(3) 眼精疲労が少ないため手術などでの長時間の利用が可能、(4) 滑らかな運動視差があるため患部を様々な角度から検討できる、(5) 複数人で観察できるため医師同士のディスカッションや患者への説明に利用できる。

空間像方式の 3 次元ディスプレイを医療応用した例はほとんど例がないが、第 IV 章「5.2 高密度指向性表示」で紹介した高密度指向性ディスプレイを用いた例として、著者の研究室と (株) AZE の間で行った共同研究<sup>1,2)</sup>について紹介する。DICOM データを高密度指向性ディスプレイで 3 次元表示するシステムを開発した。

CT や MRI による人体内部の非襲侵検査は現代医学において必須なものになっているが、これらで得られるマルチスライス画像が DICOM データである。現状では、DICOM データからの患部の特定や解析を行う 3 次元医療画像ソフトでは 2 次元ディスプレイが用いられている。元来、DICOM データは完全な 3 次元形状情報を有するため、3 次元ディスプレイを利用することが望ましいが、従来の 3 次元ディスプレイは、特殊な眼鏡の装着が必要、眼精疲労がある、奥行き絶対位置が知覚できないなどの問題点があるため、実際にはあまり利用されていない。空間像方式では、これらの問題点は解決できるため、高密度指向性ディスプレイを用いて DICOM データを 3 次元表示するシステムを開発した。

DICOM データを 3 次元表示するためには、DICOM データを高密度指向性画像に変換する必要がある。DICOM データの可視化で用いられるボリュームレンダリングで投影方法を平行投影にすることで、DICOM データから指向性画像を生成する。平行投影の投影方向をディスプレイの水平表示角度ピッチに合わせて変化させながら繰り返しレンダリングを行うことで、高密度指向性画像が生成できる。以上のように高密度指向性画像の生成にはボリュームレンダリングを繰り返し行う必要があるため、現状では、リアルタイムに DICOM データから高密度指向性画像を生成することは難しい。そこで、図 6.2-1 に示すように、DICOM データから水平一回転分の高密度指向性画像を予め生成し（これを全周指向性画像と呼ぶ）、3 次元表示時に全周指向性画像の中から利用する指向性画像を動的に切り替えることで、3 次元像をリアルタイムに水平回転することを可能にした。

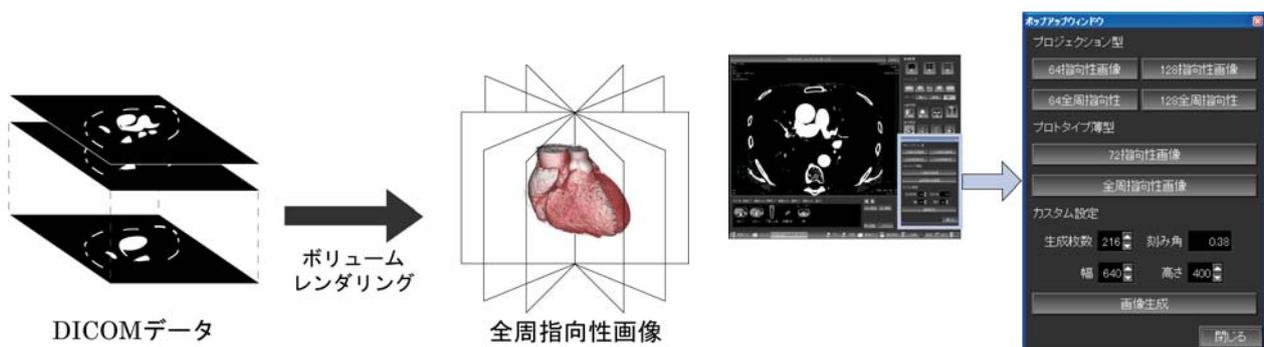


図 6.2-1 DICOM-全周指向性画像変換

図 6.2-2 ボリュームレンダリング用専用プラグイン

ボリュームレンダリングには、Virtual Place SDK ((株) AZE 製) を用いた。DICOM データから患部抽出等の処理を行った後に、全周指向性画像を生成する。開発したソフトウェアの操作画面を図 6.2-2 に示す。操作の 2 次元ディスプレイと 3 次元ディスプレイを並べて利用する形態になっている。DICOM データの 3 次元表示の例を図 6.2-3 に示す。

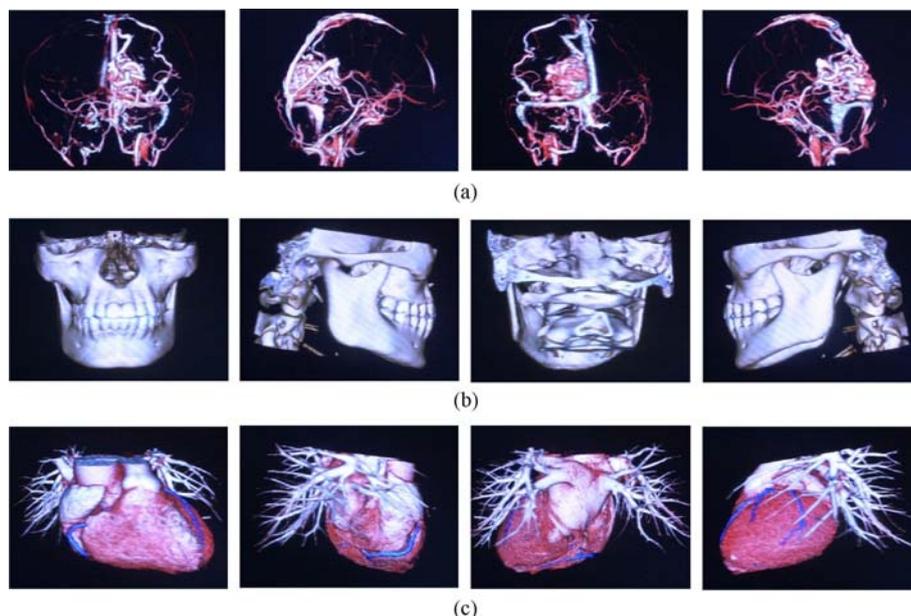


図 6.2-3 全周指向性画像を表示した 3 次元像

なお、開発したシステムを実際に病院に持ち込んで臨床医に評価してもらったところ、(1) 経験の浅い医師、医学生への教育、(2) インフォームド・コンセント、(3) 手術支援などに使えるといった意見が得られた。

最後に、将来の空間像方式の 3 次元ディスプレイの医療分野での市場規模を見積もると、現在の国内の CT の市場規模は年間約 400 億円であるので、その約 10% と見積もると約 40 億円の市場規模が期待できる。

## 参考文献

- 1) 小田原、その他、電子情報通信学会技術研究報告、ITS2004-79
- 2) 小田原、その他、3次元画像コンファレンス 2005 論文集、p.93-96 (2005.7)

## 6.3 放送応用

テレビジョン放送（TV 放送）は我が国では 1953 年に開始され、カラー化を経て現在急速にデジタル化、ハイビジョン化が進みつつある。当初、家庭で視聴できる映像サービスは放送波による TV 放送の独壇場であったが、パッケージメディアの普及、ケーブル TV や BS・CS 有料放送の参入、ネットワークによる高画質の映像配信サービスの出現など、現在は多様なメディアでの展開を見せている。この中で空間像方式による立体 TV 放送は、まだ将来のイメージとして描かれることが多く、放送システムとしての具体的な検討事例もほとんどないが、今後の検討に供するためここに展望しておくこととしたい。

### (1) 立体映像放送の現状

現在の TV は 2 次元映像を每秒約 60 フィールドで送受するものである。この技術的な枠内で実施可能なアナグリフ方式やシャッターメガネ方式が 2 眼式立体の放送として試みられた例があるが、いずれも定着に至っていない。また、デジタル放送においては左右画像を圧縮伝送することは技術的には可能であるものの実施されてはいない。これらの理由として、コンテンツ不足や生体影響への懸念など、放送実施のための環境が整っていないことが挙げられるが、比較的实现しやすい静止画においても日常目にする機会が少ないなど、立体映像自体の認知度がまだ充分でないことが理由の一つと考えられる。

空間像型については、見る位置の移動に応じた映像の変化や調節輻輳の不一致が生じないなど実物観察に近い自然な立体感が得られ、2 次元映像と異なる番組形態やサービスによって放送の可能性を大きく広げることが期待できる。しかし、早期の実用化を図るには、撮像・伝送・記録・表示を完備した技術的なシステム環境を整え、さらにコンテンツ開発も同時並行して進めてゆくことが望まれる。

### (2) 技術的課題

空間像方式は非常に多くの映像情報を扱うシステムであるため、特に撮像・表示については超高精細映像を扱うデバイスやシステム化の技術を 3D 用途の観点から新たに開発する必要がある。これは、2D 用デバイスの超高精細化については、近い将来に必要な性能

の上限に近づくと考えられ、その後の大幅な改善は必ずしも望めないためである\*。

また、現在のテレビのように幅広いジャンルをカバーする番組としてのコンテンツ制作を行う場合、たとえば多様な被写体や撮影条件に対処できる映像機器の開発が必要となる。このような機器が出揃い、はじめてコンテンツ自体の制作ノウハウが蓄積されて行くことを考えると、放送実用化までにはなお相応の期間を要する。

伝送は将来的には、衛星放送用 21Ghz 帯による広帯域伝送、さらなる大容量・高速化を実現する新しいネットワーク技術が期待される。また、符号化伝送については MPEG において多眼方式の検討が行われており今後の進展が注目される。

これまでに述べたデバイスや処理手法の進展のほかに、システム寿命の長い十分な性能を目標として設定できるよう、立体映像の標準的な評価手法やそれに用いる評価用標準モニタなどを定めることも重要である。これらは機器開発を促すためにも有効であり、この領域における研究成果に今後も期待したい。

### (3) 想定されるコンテンツと市場規模

空間像型映像による放送サービスの形態そのものは未だほとんど研究されていない。現在、奥行き情報や形状情報を取得、利用する技術研究が幅広く行われているが、参考としてこれらにおける応用分野を下記に例記しておく。

- a) 大規模空間における実際には体験できない大きい視点移動や立体感の強調
- b) 対象物の全周囲立体像や人物の立体的な動作の詳細な表示
- c) これまでの 2D 映像では表現できない金属光沢など質感の表現

たとえば a) や b) はスポーツ番組に新しい効果を与えるほか、b) は通常見られない貴重な展示物や伝統芸能を紹介する教養番組としても利用され、c) は b) とともに教育番組やショッピング番組で試料や製品を視聴者が手に取るように観察できる、などの用途が想定される。

空間像型は将来的にも 2D に取って代わって全面移行するのではなく、新たな領域を創出するように作用し映像関連の市場を押し広げると考えた方が自然に思われる。現在、NHK の経常収入と民間放送の営業収益は合わせて約 3 兆円（2004 年度）の規模、テレビなどを含む映像関連の民生用電子機器の国内出荷額は約 1.3 兆円（2003 年）であるが、普及当初は、この一部（たとえば 10%、4300 億円規模）として放送の新しい領域の発展に寄与して行くことが期待できるだろう。

---

\* 水平約 8000 画素あれば前方の水平視野 100° の範囲で画素構造が気にならない高品質の映像を提示することができる

## 参考文献

- 1) 泉武博監修、NHK 技研編：3次元映像の基礎、オーム社（1995）
- 2) NHK 年鑑 2005、放送文化研究所編、日本放送出版協会（2005.10.31）
- 3) 日本民間放送年鑑 2005、日本民間放送連盟編、コーケン出版（2005.11.25）
- 4) 電子工業年鑑 2005、電波新聞社（2005.4.20）

## 6.4 モバイル応用

### 6.4.1 はじめに

近年、携帯電話は高機能化が進み、2 インチ前後の高解像度ディスプレイ、カメラ付きが一般的となった。そして、携帯電話の CPU はますます高速化され、ドコモの携帯電話 FOMA900i を例にとれば、CPU 処理速度は約 200MHz、メモリ約 100M バイトを持ち、5年で CPU は約 20 倍に向上し、既に約 8 年前の PC と同程度の性能を現在の携帯電話は有していることになる<sup>1)</sup>。このような高機能化により、携帯端末で、ビデオやテレビ放送の映像コンテンツの鑑賞や 3D グラフィックスによるゲーム等、様々なアプリケーションを自由に楽しむことができるようになった。携帯端末で 3D グラフィックスのエンジンや、携帯端末向けの 3D ディスプレイも複数開発されてきている現在、今後は、実際に 3D として映像提示することを利用したゲームも提供可能な技術は揃ってきているといえる。

### 6.4.2 要求条件

モバイル端末の利用シーンを想定すると、3D ディスプレイが普及するためには、特有の要求条件が存在する。現在の携帯電話のディスプレイ解像度は、QVGA (320×240 画素) クラスが標準的であり、2 次元画像の閲覧においては、十分な画素数／解像度に達している。しかしながら、この端末で 3 次元画像を提示しようとする、従来のステレオ表示方式では、十分な解像度とは言えない。従来のパララックスバリア方式の場合、左右の画像を 1 つのディスプレイで表示するため解像度が 1/2 となってしまうという課題が有る。この課題を時分割提示で解決したスキャンバックライト方式や、水平方向の解像度を 2 倍にしたレンチキュラーを利用した HDDP 方式は、解像度の劣化をなくして、3D 提示が可能であり、携帯応用の打開策と言える。

モバイル用途での 3D ディスプレイの実現においては、解像度以外の特徴としては、(1) ディスプレイを手を持って映像を見ることから、見る視点位置は固定できない点、(2) 小さな画面サイズであるという点、(3) メール、画像閲覧、ゲーム等、ディスプレイは様々な用途で利用する必要があるという点がある。

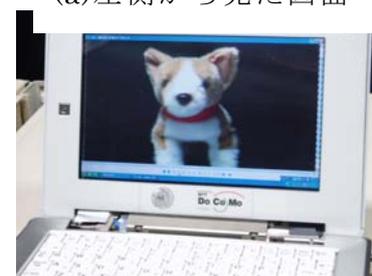
(1) においては、ユーザが見る位置を自由に調整しやすいというメリットがある反面、使用環境が一意に決められないことが特徴であり、3D が知覚できる位置が容易に探し出せることが重要である。(2) においては、画面サイズが小さいことから、表示可能な画像解像度（画素数）に限界があり、異なる視点の画像を同時に提示しなければならないという 3D 特有の課題を持つと共に、小さな画面でも効果的な立体表示でなければいけない点を考慮する必要がある。つまり、携帯端末の中に立体表示したものを、実際に手に持っているような感覚で見ることが出来ることが重要な点となる。また、(3) に関しては、3D 表示の際に解像度が劣化してしまう場合は、メール、Web 閲覧等の 2D で高解像度表示も可能になるような対応が必要であることから、2D/3D 表示を切り替えて利用できることが重要になる。

### 6.4.3 開発事例

以上のような要求条件の下、ドコモと東京農工大は、7 インチサイズで運動視差が実現可能な 3D ディスプレイを共同開発している<sup>2)</sup>。このディスプレイは、実際に手に持つ感を再現するために頭を左右に動かせば、表示物体の横が見えるような運動視差を実現したディスプレイである（図 6.4-1 参照）。観視距離に関係なく立体知覚が可能な点も特徴であり、自然な立体知覚を得ることが実現できている。



(a)左側から見た画面



(b)右側から見た画面

図 6.4-1 3D ディスプレイ

### 6.4.4 技術課題

モバイル応用としては、現在は主にエンターテインメント分野での利用が主に考えられているが、今後は TV 電話等のコミュニケーション応用を想定すると、実写対応も重要であり、カメラ画像から如何に 3D 表示できるコンテンツを生成するかが今後の課題である。また、よりリアルな立体映像提示の実現のためには、多視点化と共にディスプレイの更な

る高解像度化が必須である。そして、レンチキュラーレンズを電氣的に on/off できる方式の利用など、2D/3D 切り替え可能な方式の実現も鍵になると考えられる。

#### 6.4.5 おわりに

ニンテンドーDS やソニーPSP に代表される携帯型ゲーム機の普及も併せ、携帯端末でのゲームアプリケーションは今後も大いに発展することが期待できる。3D コンテンツが効果的に使われると考えられるエンタテインメント情報やゲーム等のコンテンツのユーザ数を i モードユーザで見ると、約 39% (2003.10 現在) が利用している<sup>3)</sup>。現在の i モード契約者数 4000 万人超であるから、ドコモユーザだけを見ても約 1560 万人のユーザが 3D コンテンツの潜在的ユーザとなり得ることになる。携帯電話の契約者数は、日本国内だけで、約 9000 万加入 (2005.12 現在) である。モバイル用途での 3D ディスプレイ、コンテンツサービスの普及は莫大な市場規模となる可能性を秘めているといえよう。

#### 参考文献

- 1) ドコモレポート No.18 「高機能化が進む携帯電話の小型・軽量化について」  
[http://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news\\_release/report/040624.pdf](http://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/report/040624.pdf)
- 2) 堀越、壺井、榛葉、高木、「モバイル用途の 3D ディスプレイ」、3 次元画像コンファレンス 2005,pp.45-48,(2005)
- 3) ドコモレポート No.16 「i モードが変えたもの」  
[http://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news\\_release/report/040220.pdf](http://www.nttdocomo.co.jp/binary/pdf/info/news_release/report/040220.pdf)

#### 6.5 アミューズメント応用

アミューズメント応用は、3 次元ディスプレイの先駆的な導入が見込め、さらに普及後も巨大な市場として期待できる分野である。アミューズメントコンテンツは、プレイヤーの潜在的な要求を開放することで、プレイヤーにストレス発散や癒しの効果を与えている。しかしながら、未だ立体視映像は普及しているとは言えず、プレイヤーは平面の映像という制約をそのまま受け入れている。これは、知らず知らずのうちに (わずかではあっても) 違和感、ひいては心理的なストレスの原因となり得る。より自然な映像を見たいという潜在的な要求を開放することで、娯楽性をさらに高めることができると期待される。

空間像方式の3次元ディスプレイをアミューズメントに応用する場合に、以下のようなメリットがある。(1) 眼精疲労が少ないため、長時間遊ぶことができる。(2) 特殊な眼鏡を装着する必要がないため、衛生上の問題を回避できる。また、複数人での利用も可能であり、プレイヤー以外の人の目を惹くこともできる。(3) 平置き化が可能であり、リアリティの向上を図ることができる。

特にアミューズメント用途では、上述のように、従来の平面視映像による違和感を取り除いたり、ストレスを解消したりすることが目的であるから、できるだけ違和感や眼精疲労の少ない方式が望まれる。視聴した結果、かえって疲れる原因となるようなことは避けるべきである。

アミューズメント分野においては、コンテンツ製作者側からの、さまざまな要求がある。

まず、解像度についての要求は、他の分野におけるものほど厳しいものではないが、3D表示時においてVGA(640×480ピクセル)程度の解像度は必要である。より具体的には、キャラクターの顔の表情が確認できる程度の解像度が要求される。キャラクターを大きくすると、顔の表情が確認しやすくなるが、大きくした分だけの飛び出し量が必要になってくる。初期のコンピュータゲームで多用されたように、キャラクターの頭を大きくデザインする等の工夫が必要である。

飛び出し量については、あればあるほど良いと言われ、観察者のすぐそばまで迫ってくるような映像には、根強い要求がある。こういった要求に応えることは、空間像方式単独では困難であるが、他の光学装置と組み合わせれば、実現できる可能性がある。また、より現実的な要求としては、ディスプレイの大きさに遜色のない飛び出し量、具体的にはディスプレイ幅の10%~50%程度の飛び出し量が期待される。例えば平置き時においては、ディスプレイをチェス等のゲーム盤に、立体映像を駒に、見立てることを想定すれば、少なくとも駒の背丈程度の飛び出し量は必要であろう。

描画速度については、アクションゲーム等のリアルタイムレンダリングを伴うコンテンツにおいては、理想的には60fps、最低でも30fpsのスピードが要求される。なお、立体視時の解像度の低下を考慮に入れると、あらかじめ高い解像度で描画する必要があるため、立体視描画の本質的な時間的コストの増加に加え、解像度の増加による時間的コストをも解決する必要がある。

プレレンダリング、すなわち、あらかじめ描画しておいた立体視映像(ムービー)については、より少ない容量で保存しておきたい、という要求がある。従来の平面視映像の場合は、画質と圧縮率のバランスから10%程度の映像圧縮が用いられるが、立体視映像についても同様の圧縮率が求められる。しかし、従来の平面視映像用の圧縮フォーマットで立

体視映像を圧縮したのでは、立体視に重要な情報が損なわれたり、圧縮比が要求に満たなかったりすることが多い。立体視映像向けの、新たな圧縮方式の開発が期待される。

コスト要求については、他の分野に比べて、かなり厳しいと言える。これは、立体視ディスプレイは開発者側から見れば、相当のハードウェア的コストのかかるものであるにも拘らず、コンテンツ製作者側から見れば、映像ソフト上の表現手段の一つであり、映像の見え方の違いにはそれほどコストをかけたくない、という意識が強いためである。具体的には、1割程度のコストアップに抑えるべきであり、例えば100万円のアーケードゲーム機の場合は10万円まで、20万円のパチンコ機の場合は2万円まで、3万円の家庭用ゲーム機の場合は3,000円までの価格アップが目安となる。

最後に、分野ごとの市場規模について述べる。

業務用AM機については、2004年度の製品販売高は、国内向け1,677億円、海外向け128億円、合計1806億円となっており、その約10%を3次元ディスプレイ市場として見積もると、180億円である。

家庭用ゲーム機（ハードウェア）およびゲームソフトウェアについては、2004年の製品販売高は、ハードウェアが国内1089億円、海外3318億円、ソフトウェアが国内2358億円、海外2327億円、合計で9,200億円となっており、合計の約10%を3次元ディスプレイ市場として見積もると、920億円である。

パチンコ、パチスロ機については、2004年の販売高は、それぞれ9,350億円、4,420億円となっている。両者を合わせると市場規模は1兆3,779億円であり、約10%を3次元ディスプレイ市場として見積もると、1,300億円である。

なお、アミューズメント市場の特徴として、ブームになるとすぐに市場を占有する傾向があるため、速効性のある分野として期待される。

## 6.6 教育応用

本調査研究の前身である「平成16年度立体映像表示に関する調査研究報告書」によると、残念ながら医療以外の教育分野における立体映像の応用事例は多いとは言えない様である。その原因について考察してみると、まず考えられるのが、教育現場において立体映像を導入するメリットがあまり感じられていない、ということであろう。一般的な学校教室に立体映像を導入することを考えると、数十人以上の多人数で同時観察できることが必要であるから、実用的に使えるものは現状では眼鏡方式の2眼式のみであろう。この方式の問題点としては、眼鏡をかける煩わしさや眼精疲労といった、視聴者に負担を強いる点

が挙げられる。この負担に対して見合うだけのメリットが見出だせていないのではないかと考えられる。また、眼鏡方式の2眼式では視聴者の頭の動きによって生じる運動視差が全く再現されないので、立体映像としての臨場感は必ずしも十分とはいえない。

空間像方式は「裸眼での多人数同時観察」可能であり、眼精疲労の問題もほとんど生じないと期待できる。つまり空間像方式であれば、3次元映像を見るために受講者側に新たに負担を求めることはなく、通常の2次元画像を見るのと同じである。それでいて臨場感の高い画像が視聴できるとなれば、導入が進むことが十分期待できる。

また、空間像方式は自然な運動視差を再現できる。つまり視聴者の頭を動かすことによって様々な方向から観察ができる。対象をじっくりと観察するということは学習の基本であり、様々な方向から自由に観察したいという要求は潜在的に高いと思われる。現に文化財などを全周囲から撮影しそのデータをアーカイブする試みが盛んに行われており、立体表示ではないがコンピュータ上でさまざまな自由な視点から鑑賞できるようになってきている。このようなシステムでは一般にマウスなどを用いて観察対象の向きを替える操作を行う。これに対し、アーカイブのデータを空間像方式で3次元表示するようになれば、まるで実物を見るかのように自分の頭の位置に応じて自由な方向から観察できる。極めて高い臨場感を感じられるだけでなく、形状が直感的に把握しやすくなり、学習効率はより高くなると考えられる。

このように、空間像方式の実用化が果たされれば教育分野への本格的な導入が進むものと期待される。空間像方式の特長を考慮した上で教育分野への応用を考えると、以下のようものが考えられる。一般的な学校教育においては、

(1) 実物の代替として観察・鑑賞

- (ア) 貴重・希少なもの（文化財・伝統芸能など）
- (イ) 取り扱い困難なもの（生物・危険なもの）
- (ウ) 保存の困難なもの（学生作品の保存・閲覧）

(2) 図面の拡張・高度な可視化

- (ア) 数学や理科におけるサイエンティフィックビジュアルイゼーション
- (イ) 生物や機械の内部構造の説明

(3) 立体的な動きの理解

- (ア) 運動・作業における動作教示

といったものが挙げられる。次に、遠隔教育における応用を考える。遠隔教育では教師と

生徒が直接会っていないという特別な状況にあるため、空間像方式による高臨場感画像通信はヒューマンコミュニケーション品質の向上に劇的な効果をもたらすと期待される。遠隔教育の対象としては

- (a) 疾病等により通学が困難な子供
- (b) 過疎地域や外国等に居住している子供
- (c) 社会人・生涯教育

などが考えられるが、とくに少子高齢化のなかで教育産業の生涯教育市場への期待は大きく、その要となるのは e-ラーニングと呼ばれるインターネット等を利用した学習である。これはネットワークを用いた遠隔教育だけでなく、インタラクティブなコンテンツによる自習も含まれるが、一般的な学校教育と同様に空間像方式による臨場感の高い画像が有用であると考えられる。

また、空間像方式による立体像は実際の物体を見る自然視に非常に近く、その自然な立体感そのものに直感的な魅力があるため、幼児を対象とした知育玩具などへの応用も有用であろう。

技術的課題としては、まず、成長過程にある若年層が視聴する場合の安全性の確保が挙げられる。空間像方式は従来の両眼視差方式に比較してより自然視に近い状態を作ると考えられるため、安全性は早期に証明されることが期待できる。次に挙げられるのは、大型の空間像方式ディスプレイの実現である。現在、大学等では講義室への大型プラズマディスプレイ等の導入が進んでいるが、これを代替できるディスプレイサイズは必要である。

最後に、教育用途における空間像方式の映像機器に関する市場規模を考えてみたい。現在、保育園・幼稚園から大学までの教育機関における、映像システム機器の市場規模は約 300 億円（2005 年度予測）であり、仮にこの内 10%が空間像方式に切り替わるとすれば 30 億円の市場があると推定される。遠隔教育に関しては高臨場感通信が実現されれば大きく発展するものと期待されるが、現在の市場規模から推定することは難しい。e-ラーニングに関しては既に 1000 億円規模の産業であり、仮にこの 1%を機器購入に割り当てられるとすると 10 億円規模の市場があると推定され、今後大きく成長すると期待される。知育玩具に関しては全体で 590 億円（2005 年）の市場規模であり、このうち約半数が電動・電子玩具が占めている。この 10%を空間像方式を応用した機器が占めるとすれば 30 億円程度の市場が見込まれる。

## 参考文献

- 1) 「平成 16 年度立体映像表示に関する調査研究報告書」
- 2) デジタル映像総覧（2004 年版）（株）富士キメラ総研

## 6.7 広告応用

空間像方式による 3 次元ディスプレイは、従来の眼鏡あり立体ディスプレイのような眼鏡をかける煩わしさがなく、また眼鏡なし 2 眼式立体ディスプレイや多眼式立体ディスプレイのように観察位置が限定されることもないため、不特定多数の人が同時に観察する広告媒体として応用することができる。

現在の広告媒体は、視覚を利用するものとしては印刷物や映像などの 2 次元情報を伝達するメディアで占められている。しかし、空間像による 3 次元広告が可能になれば、人目を引き付ける POP 広告としての機能はいうまでもなく、広告対象物の光沢感などの質感を忠実に顧客に伝達できるという、2 次元広告媒体では実現できないリアリティの高い広告としての機能を実現できる。

大手広告代理店の発表によれば、日本の総広告費は約 6 兆円であり、そのうちテレビ広告費が約 2 兆円と最大である<sup>1)</sup>。テレビを含む民生用映像機器の市場予測は第 IV 章 6.3 で述べられているので、本節では屋外または構内における広告やインフォメーション、あるいはセールスプロモーションといったいわゆるデジタルサイネージ向けの業務用映像機器の市場について調査する。

看板・ネオン等を全て含めた屋外広告費は約 3000 億円であるが、このうち映像機器を利用した屋外広告費はその 3%程度に過ぎない。しかし、フラットパネルディスプレイを用いた電子ポスターや電子ペーパーを用いた電子看板の登場にみられるように、屋外看板を映像機器で置き換えて、静止画または動画のコンテンツを複数拠点に一括配信することにより多様な広告を場所や時間帯に応じて切り替える新たな広告形態が増加傾向にある。また、ブロードバンド環境では、空間像を形成するのに必要な多数の指向性画像のコンテンツを少なくともダウンロード形式で配信できるインフラは既に整備されている。さらに、地下鉄駅構内に設置された缶飲料の 3 次元広告看板の登場にみられるように、既に印刷分野では空間像型の広告看板の実用化が始まっている。したがって、3 次元ディスプレイが実用化されて臨場感の高い 3 次元屋外広告を映像機器で行うことが可能になれば、デジタルサイネージ市場が飛躍的に拡大することが予想される。

市場調査会社のレポートによると<sup>2)</sup>、今後のサイネージ市場の有望分野は、流通／店舗、

外食産業、公共施設、レジャー／アミューズメント施設、交通機関の 5 分野とされている。この他に、現在導入が進んでいる一般企業（ショールーム）、大学、金融機関がある。これらは LCD、PDP、プロジェクターを用いたものであるが、この他に主に大型のフルカラー LED を用いたビルボードがある。これらが 3 次元広告に置き換わった場合に想定される広告形態を以下に述べる。

#### (1) 流通／店舗

ショッピングセンター、コンビニエンスストア、カーディーラー、スーパー／百貨店等における店頭や受付等において、実物展示の代わりに臨場感の高い商品広告を行うことにより少量多品種の商品展示が可能になり、消費者の購買意欲を促進するものと期待される。

#### (2) 外食産業

ファミリーレストラン等のテーブルに設置した 3 次元ディスプレイに臨場感の高いメニューを表示することにより、顧客の食欲を促進するオーダーリングシステムを構築できる。

#### (3) 公共施設

ホテルや大型ビルなどにおいて、不特定多数の顧客に対して、複雑な商品形状や素材の質感等の情報を静止画として瞬時に伝達することができる。

#### (4) レジャー／アミューズメント施設

映画館、カラオケ店、パチンコ店等における店頭や施設内において、商品広告や施設案内として利用できる。

#### (5) 交通機関

鉄道駅構内、車両内、道路サービス施設、空港などにおいて、施設案内等のインフォメーションを 3 次元表示することでバリアフリーな利用が促進される。

#### (6) ビルボード

駅前や繁華街などにおいて、音楽情報の提供や、自動車、携帯電話等のアイキャッチ広告としての機能を向上できるだけでなく、広告対象も多様化することができる。

ところで、これらの (1) ～ (5) の映像機器の 2005 年の販売見込は 129 億円であり、

コンテンツ制作、配信、システム構築等の費用を加えたサイネージ市場全体としては、映像機器市場の約 1.5 倍の約 200 億円と見込まれている。そして、2010 年には映像機器市場が 180 億円に成長し、サイネージ市場全体では 270～280 億円と予測されている<sup>2)</sup>。

そこで、これらのデータから空間像方式の 3 次元ディスプレイの市場規模を見積もるために、2010 年の映像機器の 10%が空間像方式の 3 次元ディスプレイに置き換わったと仮定すると市場規模は 18 億円となる。そして、コンテンツ制作等を含めた空間像方式のサイネージ市場全体では、この 1.5 倍と仮定すると 27 億円と推定することができる。

#### 参考文献

- 1) 2004 年 日本の広告費 株式会社電通  
<http://www.dentsu.co.jp/marketing/adex/adex2004/index.html>
- 2) デジタル映像総覧(2006 年版) 株式会社富士キメラ総研 (2006)

## 7 今後の研究開発

### 7.1 表示デバイス

#### 7.1.1 3D 表示性能と必要なパネル画素数の見積もり

ここでは 3D 表示性能と必要なパネル画素数の見積もりを行う。仮定として光線数は 2D パネルの縦横に均等に割り振られるとした。すなわち

$$2D \text{ パネル解像度 (水平)} = 3D \text{ 解像度 (水平)} \times \sqrt{\text{光線数 (水平)} \times \text{光線数 (垂直)}}$$

$$2D \text{ パネル解像度 (垂直)} = 3D \text{ 解像度 (垂直)} \times \sqrt{\text{光線数 (水平)} \times \text{光線数 (垂直)}}$$

により計算した。垂直の光線数が 1 となっている場合は水平方向のみに視差を与えている。

表 7.1-1 3D 表示性能と必要な 2D パネル画素数

3D解像度		光線数		2Dパネル解像度	
水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
320	240	16	1	1280	960
320	240	32	1	1810	1358
320	240	64	1	2560	1920
320	240	128	1	3620	2715
320	240	8	8	2560	1920
320	240	16	16	5120	3840
320	240	32	32	10240	7680
640	480	16	1	2560	1920
640	480	32	1	3620	2715
640	480	64	1	5120	3840
640	480	128	1	7241	5431
640	480	8	8	5120	3840
640	480	16	16	10240	7680
640	480	32	32	20480	15360
1280	720	16	1	5120	2880
1280	720	32	1	7241	4073
1280	720	64	1	10240	5760
1280	720	128	1	14482	8146
1280	720	8	8	10240	5760
1280	720	16	16	20480	11520
1280	720	32	32	40960	23040
1920	1080	16	1	7680	4320
1920	1080	32	1	10861	6109
1920	1080	64	1	15360	8640
1920	1080	128	1	21722	12219
1920	1080	8	8	15360	8640
1920	1080	16	16	30720	17280
1920	1080	32	32	61440	34560

現状では 4K×2K 程度のパネルが入手可能であるが、このようなパネルを使用してもハイビジョンクラスの 3D 表示には程遠いことがわかる。時分割多重を併用するなどの技術開発が不可欠である。

### 7.1.2 LCD の場合の課題

ハイビジョンクラスのパネルが市場に出回るようになってきている。さらには 4K×2K 程度の LCD パネルも製品化されている。今後、さらに画素数が多くなることで画素サイズが小さくなると画素開口率が低下して輝度が低下するといった問題が生じる。大型化や微細化により配線遅延が生じることも予想される。微細化が進み一素子のサイズが今より格段に小さくなると新たな素子設計も必要となってくる可能性がある。

### 7.1.3 3D 応用に特化した表示デバイスの必要性

従来の 3 次元ディスプレイは既存の平面ディスプレイを用いたものが多くその結果として 3D 特性を十分発揮できていない場合があった。3D に適した専用ディスプレイを開発することにより 3D 表示特性を向上できる可能性がある。

画素配列は平面ディスプレイの基本構造であり、3D 特性と密接に結びついている。3D に適したモザイクカラーフィルター配列を用いた試作例が報告されている<sup>1)</sup>。一般に立体ディスプレイは LCD などのフラットパネルディスプレイ (FPD) の前面にレンチキュラーシートを設置した構成になっている。FPD は通常 RGB の各サブ画素を有しているが、その配列は図 7.1-1 の (b) に示すような縦ストライプ配列がよく用いられている。この場合、レンチキュラーレンズを斜めに傾けて設置することで垂直画素成分を水平画素成分に割り当て立体ディスプレイの水平解像度の劣化を少なくすることができる。しかし 3D 解像度の上下左右の対称性が悪くなることがある。また、観察者の上下方向の動きにより視域が左右にシフトするといった問題があった。後者は特に平置き型にした場合、問題となることがある。一方、図 7.1-1 の (a) に示すようなモザイク配列の FPD を用いた場合にはレンチキュラーレンズを垂直に設置しても水平解像度の劣化を低減できる。さらに 3D 解像度の上下左右の対称性もよく、観察者が上下方向に動いても視域が左右にシフトしないという特長を持つ。

液晶層を挟むガラスの厚さも重要なパラメータである。これは複数画素からなる要素画像幅とガラス厚の幾何学的な関係から最大視域角が決まるからである。視域角を数十度以上に広げるにはガラス厚を現状で用いられている厚さ (例えば 0.7mm) より薄くする必要がある。

使用するパネルの 2D 縦横画素アスペクトも重要である。3D 縦横画素アスペクトはパネルにセットする光線制御素子により一般にもとの 2D パネルの縦横画素アスペクトと異なる

ることが多い。アスペクト比があまりに高いと見栄えに影響するため、3D 縦横画素アスペクトが適当な値となるように 2D 縦横画素アスペクトをずらしておくことも有効である。

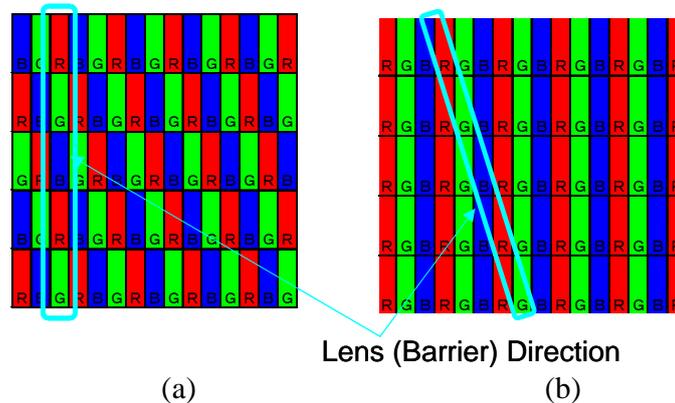


図 7.1-1 (a) モザイク配列と (b) 縦ストライプ配列

#### 7.1.4 LCD 以外の表示デバイスの利用

最近のフラットパネルディスプレイ（FPD）技術の進展はめざましく LCD 以外にもプラズマディスプレイパネル（PDP）、有機 EL、表面電界ディスプレイ（SED）<sup>2)</sup>といったパネルが販売あるいは開発されている。SED はブラウン管（CRT）のような明るくてコントラストの高い画面を大型平面ディスプレイで実現する技術であり、消費電力も比較的小さい。このため LCD や PDP と並んで次世代の大画面 FPD として期待されている。このような基本特性の向上はそのまま 3 次元ディスプレイの基本特性の向上に結びつく。またフレキシブルディスプレイ（曲がるディスプレイ）の開発も盛んであり曲がる 3 次元ディスプレイも将来は可能になるかも知れない。

高速動作が可能な OCB 液晶や強誘電性液晶（FLC）を用いることにより時分割多重表示して実効的な画素数を倍以上に増すことも考えられる。

投射型としてはデジタルマイクロミラーデバイス（DMD）<sup>3)</sup>やグレーティングライトバルブ（GLV）<sup>4)</sup>といった素子を用いたものが開発されており、3 次元ディスプレイにも応用できる可能性がある。

#### 参考文献

- 1) K. Taira, et al., “Autostereoscopic Liquid Crystal Display Using Mosaic Color Pixel Arrangement,” Proceedings of SPIE 5664, pp. 349-359, 2005.
- 2) <http://web.canon.jp/technology/display/>

- 3) <http://www.ti.com/corp/docs/landing/dlp/index.htm>
- 4) <http://www.siliconlight.com/htmlpgs/homeset/homeframeset.html>

## 7.2 画像合成

ここでは、主に空間像方式における、CG (Computer Graphics) による画像合成について述べる。具体的な描画方法として、(1) 視点毎に描画を行う方法、(2) 奥行き画像を活用する方法、(3) レイ・トレーシング法、について簡単に解説した上で、描画速度、特にインタラクティブ化を目指した高速化の観点から考察を加える。なお、実写における立体視画像生成方法については、第IV章 7.5 を参照されたい。

まず、視点毎に描画を行う方法について述べる。1 つの視点からレンダリングを行う方法は、多くのパーソナルコンピュータ、業務用及び家庭用ゲームマシン等に搭載されている GPU (Graphic Processing Unit) に、基本機能として実装されている。これを活用すれば、簡単かつ高速に 1 視点分の映像が生成できるので、2 眼式や多眼式の立体視においては、1 視点毎に描画を行ってビュー (1 視点からの画像) を生成し、最後に全てのビューを合成 (インターリーブ) する方法が、一般的であった (図 7.2-1)。空間像方式においても、視点を設定することができる場合 (平行投影含む) には、この方法を適用することができる。ただし、立体視表示の解像度を落とさないという条件の下では、視点数 (指向性光線数) に比例した描画時間がかかることとなる。また、インターリーブは RGB のサブピクセル単位で行う (図 7.2-2) 必要があるが、そこでさらに時間が取られることとなる。高速化については、視点毎に並列化する方法が考えられるが、視点数だけ GPU を用意せねばならず、装置が大掛かりになりがちである。なお、多眼式では、専用のハードウェアによって、複数のビューの描画とインターリーブ処理を、1 回の読み込みと書き出しで完了させ、リアルタイム描画を行えるようにした例がある<sup>1)</sup>。

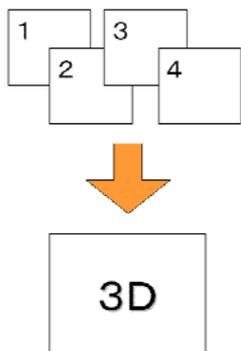


図 7.2-1 視点ベースの方法

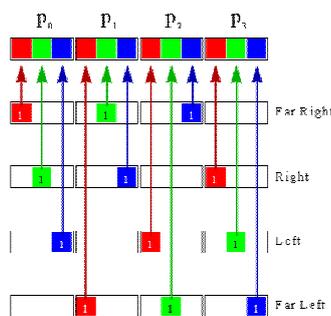


図 7.2-2 サブピクセル単位のインターリーブ

次に、1 視点からの画像と、それと同じ視点からの奥行き画像（デプスマップ）から、立体視画像を生成する方法について述べる。この方法では、回り込んで見るための情報が欠落しているため、回り込むと輪郭部分が柱状に伸びて見える等の不自然さが残るが、1 視点描画からの転用が容易であるため汎用性が高く、簡易的に立体視画像を得るには良い方法である。この方法では、(1) 視点ベースの方法で通常画像と奥行き画像を描画、(2) 通常画像と奥行き画像から立体視画像を合成、の 2 ステップで描画が完了する。ステップ (1) においては、通常画像と輪郭の一致した奥行き画像を得ることが必要であるが、これは CG であれば容易である。例えば、視点毎の描画方法として広く用いられている Z バッファ法では、画素毎の奥行き値を描画に使用するので、描画を終えたときに、通常画像（図 7.2-3）と共に、デプスマップ（図 7.2-4）が自動的に作成されている（正確には、デプスマップの値は視点からの距離そのものとは限らず、逆数が代入されているような場合もあるため、変換を行って、奥行き画像を得る）。ステップ (2) の処理については、図 7.2-5 を参照して解説する。(a) は奥行き画像、(d) は通常画像である。まず、奥行き画像 (a) を階段状の立体 (b) と解釈する。次に、各画素から射出される光線と (b) との交点を求める (c)。そして、(c) の交点に対応する通常画像 (d) 上の画素を参照し、その色を立体視画像の画素値として代入する。これを全画素について行い、最終的な立体視画像を得る。

この方法の描画時間については、ステップ (1) では、視点ベースのレンダリングとなるため、解像度に比例せず、むしろポリゴン数によるところが大きい。そのため、立体視表示の解像度を落とさないように画素数を増やして描画を行ったとしても、(GPU の仕様によるので具体的な算出は困難であるが、)画素数に比例した時間よりも短時間で描画を行うことができる。一方、ステップ (2) の処理は、画素単位で行われるので、画素数に比例した処理時間が必要となる。そのため、この (2) の処理を如何に高速に行うかが肝要となる。なお、(2) の処理は画素毎に並列化が可能であるが、最近の GPU では、画素単位での描画エフェクトを可能にするピクセルシェーダ機能が標準的になりつつあり、数画



図 7.2-3 通常画像

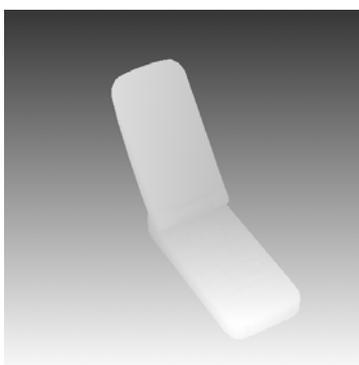


図 7.2-4 奥行き画像

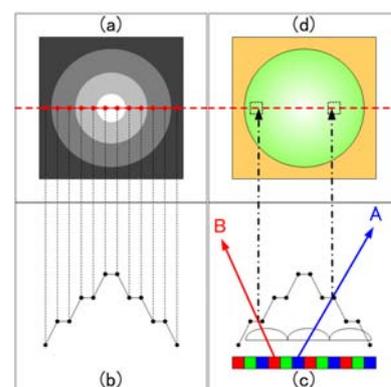


図 7.2-5 立体視画像の合成

素単位での並列処理が可能になっているものも存在する。これらの時代の潮流から判断して、この方法には追い風が吹いていると言える。

最後に、レイ・トレーシング法について述べる。レイ・トレーシング法は、各画素から視点に至る光線（レイ）を計算し、それを逆に辿ることで描画を行う（図 7.2-6）方法で、光の反射・屈折等まで考慮に入れた、高品位な CG の作成に用いられる。これを立体視に応用するには、各画素からの光線の方向を、立体視用の方向に置き換えて描画を行うだけで良い（図 7.2-7）。ただし、描画は RGB のサブピクセル単位で行う必要がある。また、描画コストは、総画素数に比例するため、立体視表示の解像度を落とさない前提の下では、視点数（指向性光線数）を  $n$  とすれば  $n$  倍の描画時間が必要になる。

レイ・トレーシング法は、Z バッファ法等と比較して、描画時間が遥かにかかるため、リアルタイム描画には向かず、ゲーム等のインタラクティブな用途ではほとんど使用されない。しかし、計算が画素毎に独立しているため、並列化の効果が高いものと期待されている。並列化を行うことで、1 視点のレイ・トレーシングが解像度によらずリアルタイムで可能となれば、同時に立体視用のリアルタイム描画にも道が開けることになる。

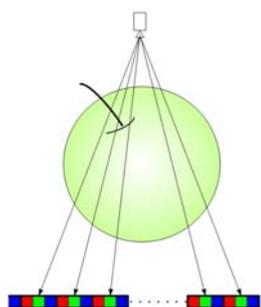


図 7.2-6 レイ・トレーシング法

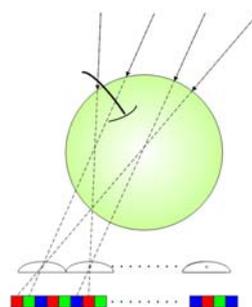


図 7.2-7 レイ・トレーシング法を立体視に適用

#### 参考文献

- 1) 宮沢、花田、伊丹、石井：立体視ゲーム・コンソールのアーキテクチャとモバイル・マルチメディア環境への応用、3次元画像コンファレンス 2000 論文集、pp.1-4

### 7.3 圧縮

3次元画像を通信する際のデータ量の削減法、すなわち情報圧縮に関して述べる。空間像方式は空間中の光の状態を多数の光線の集合によって再現するか、またはホログラフィ法などによって波面を再現するものであり、第IV章4節に挙げたものを含めさまざまな方式が可能性として考えられる。しかしながらその映像ソースを考えると、実写の場合の多くは多眼カメラもしくは IP の撮像系などによって得られた多視点画像によることとなる

であろう。

情報圧縮とは取得した情報から冗長性を取り除き、または必要性の低い情報を削除することによって、データ量を小さくすることである。多視点画像に含まれる冗長性は大きく3種類に分けられると考えられる(図 7.3-1)。一つ目は(1)フレーム内の冗長性、これは2次元画像そのものが持つ冗長性である。例えば、隣接する画素同士は似たような色であることが多いため一般に画像の空間周波数スペクトルを求めるとエネルギーは低周波側に集中する。このため例えば JPEG や MPEG 等では画像をブロック分割した後離散コサイン変換しその高次の係数に割り当てるビットを削減することによって情報圧縮を行っている。二つ目は(2)時間フレーム間の冗長性である。これは動画像において時間的に連続する画像は類似度が高いというものである。この特徴は MPEG においてフレーム間予測・動き予測符号化として用いられている。もう一つは(3)視差画像間の冗長性である。これは近い視点から撮影された画像同士の類似性によるものである。

空間像方式の入力としての多視点画像が従来の多眼式ディスプレイを対象にしたものと大きく異なるのは、従来のものが人間の両眼間隔などを基準としているのに比して、視差間隔が非常に細かく、かつ多くの視差画像数が必要となる点である。したがって視差画像間の冗長性をいかに利用して効率的な圧縮を行うかが鍵となる。視差画像間の冗長性は撮影の対象となる3次元空間の構造に由来するものであり、冗長性を効率的に取り除くという問題は3次元画像情報をどのような形で記述するかという問題に帰着される。

3次元画像情報の記述法に関しては、特にコンピュータグラフィックスの分野において自由視点映像生成という枠組みで議論が行われてきた<sup>1)</sup>。自由視点映像生成技術には大きく分けて2つのアプローチが存在する。

一つはモデルベースと呼ばれるもので、幾何形状モデルと表面テクスチャによって3次元シーンを記述し、コンピュータグラフィックスの手法を用いてレンダリングを行うことで自由視点映像の生成を行うものである。幾何モデル構築の手法はコンピュータビジョンにおける3次元形状復元・計測の問題と密接な関連があるが、自由視点映像生成においては多視点画像から奥行きマップ(Depth Map)を生成する方法が代表的である。もう一つイメージベースと呼ばれるもので、対象の幾何形状モデルを用いることなく、撮影した多視点画像をもとに幾何変形等の処理を施して自由視点画像を生成するものである。特に画素情報を光線として取り扱う光線空間法や Light Field Rendering と呼ばれる手法が注目されており、光線という考え方から空間像方式との相性もよいと考えられる。しかしながらこれら両アプローチはそれぞれ特徴があり、どちらかが優れているという性質のものではない。むしろ両者のエッセンスを取り込んだ折衷的な提案が数多く見られる。空間像方

式では特に細かな視差間隔の画像を取り扱うこととなるので、これに適した3次元画像記述法を開発することが効率的な圧縮のための重要な課題となる。

一方、多視点画像の圧縮符号化の標準化についての動きもある。現在 MPEG において「多視点映像符号化 (Multi-view Video Coding)」に関する議論が進められている。2005年7月に技術提案を募集する Call for Proposals が発行され<sup>2)</sup>、これに応じて8件の技術提案が提出された。2006年1月の会合ではそれらの評価が行われ、提案に含まれている要素技術毎に性能向上の寄与を度合いを検討する目的でコア実験を行うことが決定した<sup>3)</sup>。コア実験の対象となる要素技術は大きく5種類に分けられるが、その中心となるのは「時空間相関を利用した手法」である。これは従来の2次元動画画像圧縮が利用している時間フレーム間の相関性に加え、視点間の相関性をも利用するための技術であり、提出された8件の提案全てにこの要素は含まれている。具体的な手法としては H.264/AVC をベースとし、フレーム間予測符号化に用いる参照フレームを時間方向だけでなく視点方向にも拡張することなどが提案されている。

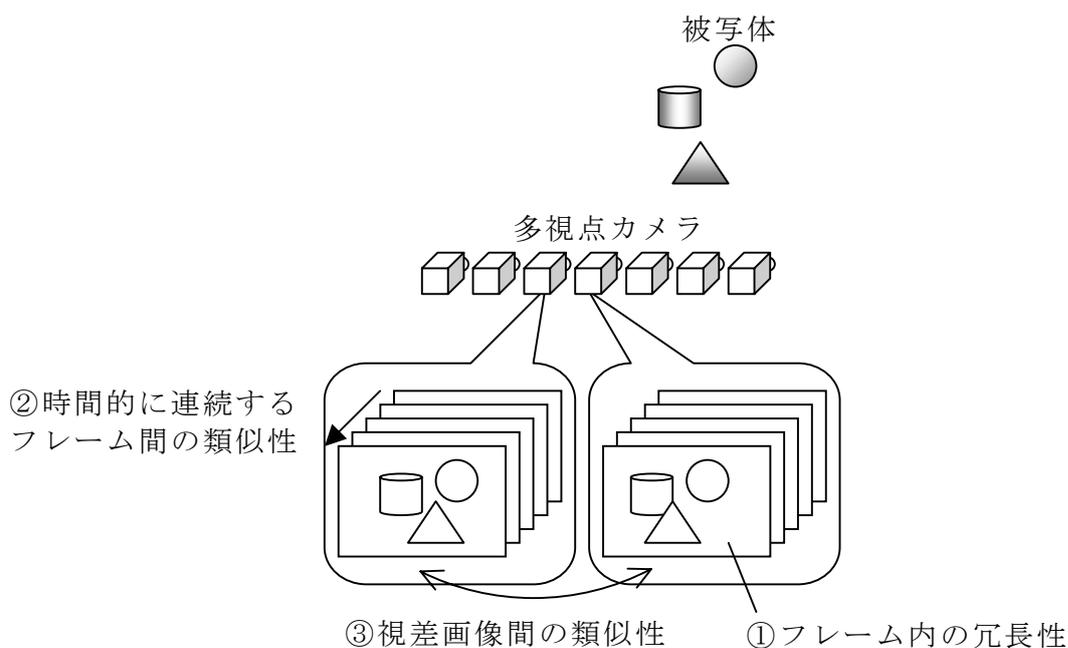


図 7.3-1 多視点画像の冗長性

#### 参考文献

- 1) 谷本,藤井,「自由視点映像技術」、映像情報メディア学会誌 Vol.60, No.1, pp.29-34(2005)
- 2) “Call for Proposals on Multi-view Video Coding”, ISO/IEC JTC/SC29/WG11 N7327
- 3) “Description of Core Experiments in MVC”, ISO/IEC JTC/SC29/WG11 N7798

## 7.4 記録・通信

空間像方式は、従来の2眼式や多眼式に比べて、映像のもつデータ量がかなり増大することが予想される。そこで、空間像方式の3次元映像のもつデータ帯域、データ容量について考察する。なお、考察にあたっては、本調査研究の前身である「平成16年度立体映像表示に関する調査研究報告書」<sup>1)</sup>を参考にした。

空間像方式の3次元映像の圧縮には、従来の2次元画像のように時間軸方向の類似性に加えて、表示する指向性画像間の類似性、すなわち、表示方向に対する類似性を活用することができるため、高い圧縮効率が期待できる。

最初に、表示方向に対する圧縮の見積もりを行う。ここでは、東京農工大学で行われた全周指向性画像の圧縮<sup>2)</sup>を例に考える。この場合は、3次元物体の水平一回転分の指向性画像を解像度320×400で947枚生成した。総データ量は347MBである。これを、H.264 CODECを用いて圧縮した結果を図7.4-1に示す。データ量が5MBのときに、35dB以上のPSNRが得られていることがわかる。これは、約13枚分の指向性画像のデータ量に対応する。3次元表示においては、全周データが必要になることは稀であるから、ここでは、空間像方式の3次元映像に必要なデータ量は2次元画像5枚分であると仮定する。

現状の2次元映像のデータ帯域は、時間軸方向の圧縮のみを用いて、DVDビデオで4.6Mbpsで、地上デジタル放送で17Mbpsである。以上より、DVDビデオと地上デジタル放送相当の解像度を有する空間像3次元映像の伝送に必要なデータ帯域を見積もると、表7.4-1に示すようになる。また、2時間の映像を記録するために必要なデータ量も同表に示した。

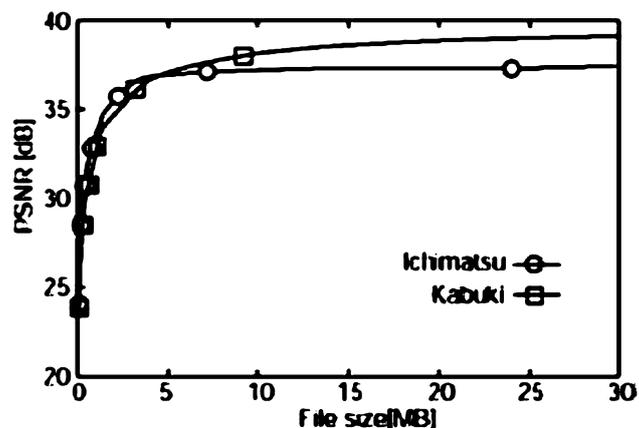


図 7.4-1 H.264 CODEC による全周指向性画像の圧縮

表 7.4-1 空間像 3 次元映像のデータ帯域とデータ容量

	データ帯域	データ容量
DVD 相当解像度	23 Mbps	20 GB
地上デジタル放送相当解像度	85 Mbps	76 GB

つぎに、空間像方式 3 次元映像の光ディスクへの記録について考える。表 7.4-2 に次世代光ディスクの規格を示す。DVD 相当の解像度の空間像方式 3 次元映像であれば、次世代光ディスクでも記録可能であることがわかる。また、ホログラフィックメモリ等の次々世代の光ディスク技術では、データ帯域 100Mbps~1Gbps、データ容量 200 GB~1 TB が実現できると言われているので、地上デジタル放送相当の解像度をもつ空間像方式 3 次元映像の記録も可能になると予想される。

表 7.4-2 次世代光ディスクの規格

	データ帯域	データ容量
HD DVD	36 Mbps	再生専用(HD DVD-ROM) 1層 15GB 2層 30GB 書換(HD DVD-ARW)1層 20GB 2層 40GB
BluRay	36 Mbps	1層 23.3/25/27GB 2層 50GB

つぎに、デジタル放送およびインターネットの利用について考える。表 7.4-3 にデータ帯域をまとめた。DVD 相当の解像度の空間像方式 3 次元映像であれば、現在のデジタル放送やインターネット技術でも対応できる可能性があることがわかる。ただし、地上デジタル放送相当の解像度の空間像方式 3 次元映像の伝送には、光ファイバー通信レベルのデータ帯域が必要になる。

以上のように、空間像方式の 3 次元映像は、従来の 2 次元映像に比べて、表示するデータ量は格段に増えるが、データの圧縮率を非常に高くできるため、DVD 相当の解像度の空間像方式 3 次元映像であれば、現状の記録・伝送技術でも対応可能である。ただし、データ圧縮には非常に多くの計算量が必要になることが予想されるので、データ圧縮方式の検討に加えて、専用 LSI 等の開発が課題になると考える。

表 7.4-3 放送、インターネットのデータ帯域

方式	データ帯域
BS/110 度 CS デジタル放送	24 Mbps
地上デジタル放送	17 Mbps
ADSL	50 Mbps
光ファイバー	100 Mbps
ケーブルテレビ回線	30 Mbps

## 参考文献

- 1) 平成 16 年度立体映像表示に関する調査研究報告書、(社) 日本機械工業連合会、(社) 日本オプトメカトロニクス協会
- 2) H. Hanuma, et al.: Three-dimensional camera capturing 360 directional image for natural three-dimensional display, Proc. SPIE, vol. **6016**, 601601H (2005.10)

## 7.5 3次元画像入力

立体映像システムの研究・開発においては表示手段が先行して検討されることが多いが、今後の立体映像コンテンツの開発、立体映像の応用分野の拡大を図るためには入力技術の重要性にも留意しておかなければならない。入力手段については、実写のほかに CG や変換処理による方法を用いることができる。ここでは主に実写映像を対象とした開発例を紹介する。CG などの生成画像による方法については第IV章 7.2 節を参照されたい。

被写体の奥行き情報や 3次元情報を自由な映像生成（レンダリング）を行うための手段と考えた場合、取得した被写体データから 3D 映像を生成する方法として、3D 座標とテクスチャとして表現するモデルベースレンダリングと、モデル化を行わず実写映像群とそれに内在する光線情報により映像を 3次元的に操作するイメージベースレンダリングに大別される。いずれの方法も入力には多量の画像情報の取得が必要となる。前者では、取得した映像から奥行き情報を得るほか、映像以外の能動的な手段により奥行き情報を取得する手法など、多様な手法が存在する。後者では、さらに多くの画像情報の取得が必要で、光線情報の取得・再現を行う観点から、密に配列されたカメラアレイやレンズアレイと高精度カメラの組み合わせが用いられる。

以下に紹介するこれらの入力技術では、2D 表示において視点を自由に設定する、3DCG との 3次元的な合成を行う、など立体視を直接の目的としていないものも含まれるが、基本的には広く 3D 表示への適用が可能である。

### (1) マルチカメラによる方法

図 7.5-1 は 3D 実写動画オブジェクトの取得の事例として、19 台のカメラ（上段 12、下段 6、真上 1）を用いた装置を示している<sup>1)</sup>。ここでは 2つの手法-視体積交差法とステレオ法を効果的に組み合わせることで、10 フレーム/秒の実写動画による被写体の 3D モデルを得ている。図 7.5-2 はこれを応用し 3D モデル化したキャラクタを他の映像とリアルタイム合成して表示した例である。

3D モデルの構築を行わないイメージベースレンダリングとして、光線情報や光線空間に基づく原理により被写体からの光線を再生することに主眼を置いた入力手段がある<sup>2,3)</sup>。これらは、カメラ配列の密度を高める代わりに視点内挿処理を行うことによって、様々な視点から見た映像を再生するために必要な高密度な光線群を取得している。



図 7.5-1 複数カメラによる撮影装置



図 7.5-2 3D 実写映像のモデル化例  
(バーチャルペット)

## (2) 超高精細撮像とレンズアレイによる方法

マルチカメラではなく、レンズアレイと超高精細カメラの組み合わせ構成による入力方法も考えられる(たとえば第IV章 5.1 節)。単一の超高解像度カメラを用いる場合、マルチカメラと比べてカメラ間の特性差や位置誤差の問題は少ない。しかし、今後のさらなる画素数の増加に対しては高速の駆動・信号処理回路、撮影レンズの解像度特性の確保などに課題が生じる。

## (3) 奥行き情報の直接的な取得 —距離計測手段を援用する方法—

撮影した映像情報以外にレーザーや赤外光により、また工業的な計測では特殊パターンの投影などにより 3D モデルデータを得る方法で、奥行き情報が直接得られ様々な立体表示に利用しやすい利点がある一方、奥行き範囲が一定に限られることや奥行きデータの解像度が一般には低いことが課題としてあげられる。図 7.5-3 に示す事例 (Axi-vision) は、奥行き情報を元に実写と CG の映像合成に用いられたが、立体映像表示への利用も考えられる。LED から近赤外の強度変調光を照射し、被写体からの反射光を高速シャッター付き高感度カメラにより捕捉し、演算処理することで高解像度の距離情報 (1280×720, 29.94Hz) を得ている。ハイビジョンカメラと組み合わせた合成にも用いることができる<sup>4)</sup>。

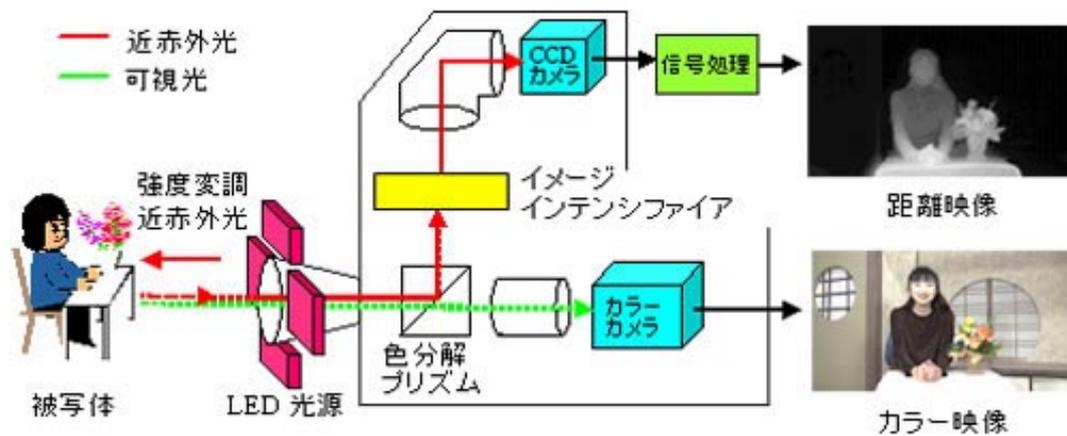


図 7.5-3 HDTV Axi-Vision カメラの構成図

#### 参考文献

- 1) 富山ほか、映情学誌 58, 6, 797-806 (Jun., 2004)
- 2) 苗村、原島、5-6、.165-170, 3次元画像コンファレンス 1998
- 3) 谷本、映情学誌 58,7, pp.898-901 (2004)
- 4) 河北、平成 14 年度技研公開 講演・研究発表会予稿集 p58-61 (5月、2002年)

#### 7.6 光学デバイス

空間像方式における光学デバイスとは、第IV章 7.1 に述べられている表示デバイス上の画像を物体面とする光線の進行方向を制御することにより、3次元の空間像を形成させるものをいう(図 7.6-1)。光学デバイスは、第IV章 4.5 のホログラフィー方式では本質的に不要であるが、第IV章 4.1～4.4 の各方式では光線を制御するために必要不可欠である。

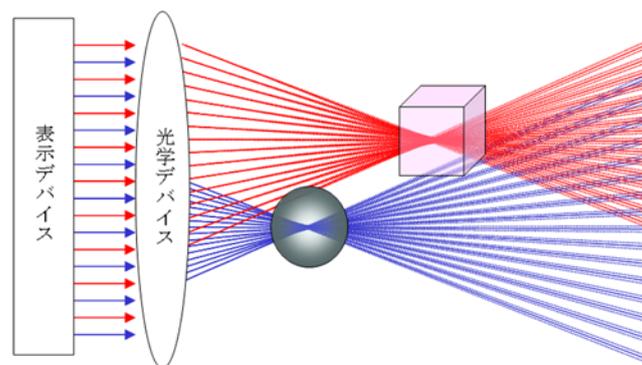


図 7.6-1 光学デバイスの機能

光学デバイスの例としては、4.1 のインテグラルフォトグラフィー方式におけるレンズアレイや 4.2 のレンチキュラー方式におけるレンチキュラーシートなどの屈折光学素子、あるいは 4.3 のパララックスバリア方式等における開口光学素子がある。また、4.4 のプロジェクション方式のように異なる種類の光学素子を組み合わせた構成や、反射光学素子、回折光学素子等がある。

これらの光学デバイスの共通点は、いずれも複数の光学素子のアレイを含むことである。これは表示デバイス上の多数の画像からの光線を所定の単位で分割して異なる方向に偏向するためには、その分割単位に応じた数の光学素子が必要になるからである。

このような分割方法には空間単位での分割（即ち画素単位や画像単位での分割）や時間単位での分割（即ちフィールド単位やフレーム単位での分割）、又はこの組み合わせがある。

空間単位での分割を屈折光学素子で実現する場合、光学材料としては量産性、コスト、加工性等の面で樹脂材料が現実的である。しかし、環境によるアレイ間隔の変動や、反りなどの基板の変形が問題となる。この問題を解決する技術として、ガラス基板と高屈折率樹脂からなる複合型光学素子が有望である<sup>1)</sup>。これはガラス基板上に滴下した紫外線硬化性樹脂を金型で成形するものである。石英と同等の耐環境性と品質が実現されており、高精度な両面成形も可能である。将来基板サイズの大面積化が可能になれば、信頼性の高い光学デバイスが実現できるものと考えられる。

一方、時間単位での分割を行う光学デバイスとしては、機械的または電氣的に高速駆動させた開口光学素子が知られているが（第IV章 4.3 及び 5.4 参照）<sup>2,3)</sup>、屈折光学素子を時間単位での分割に用いた例はまだ報告されていない。しかし、応答速度に対する要求が緩やかな 2D/3D 切替の用途としては、屈折光学素子と表示デバイスの距離を機械的に変化させる技術が報告されている<sup>4,5)</sup>。また海外では、屈折光学素子の光学特性を電氣的に切り替える技術が報告されている<sup>6,7)</sup>。

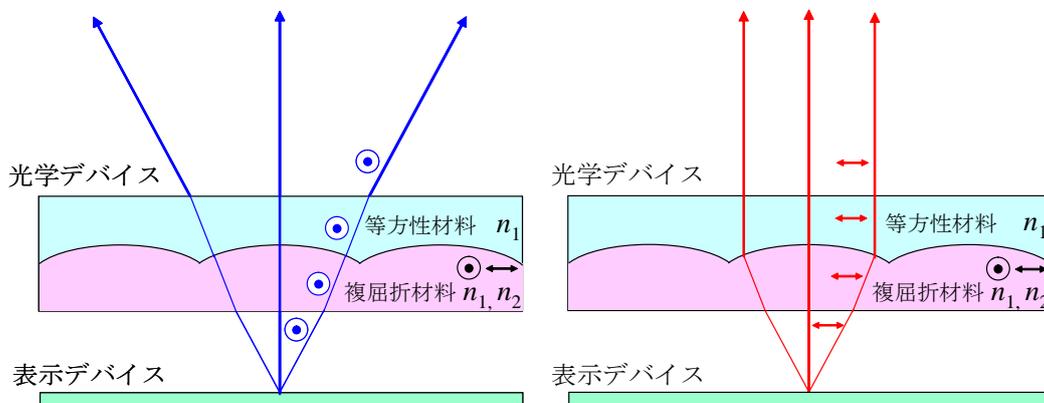


図 7.6-2 動的な光学デバイスの例：オフ状態（左）、オン状態（右）

図 7.6-2 に示すように、複屈折材料からなる凸レンズアレイと、等方性材料からなる凹レンズアレイを密着させて配置し、複屈折材料の一方向の屈折率（例えば紙面に垂直な方向の屈折率  $n_1$ ）が、等方性材料の屈折率  $n_1$  と等しくなるようにする。そうすると、紙面に垂直な直線偏光が光学デバイスに入射した場合（図 7.6-2 左）、両材料の界面で屈折力が発生せず、平行平板として機能する。一方、紙面に平行な直線偏光が入射した場合（図 7.6-2 右）、複屈折材料の紙面に平行な方向の屈折率  $n_2$  が等方性材料の屈折率  $n_1$  と異なるためにレンズ効果が現れる。英国 Ocuity 社では光学デバイスから出力される偏光状態を両モードで一致させるために、さらにスイッチング液晶を用いて偏光面を回転させている<sup>6)</sup>。また凸レンズアレイ内部の複屈折材料を液晶で構成した蘭 Phillips 社の例もある<sup>7)</sup>。

さらに、3次元表示以外の分野では屈折光学素子の面の曲率を直接制御する技術が実用化を迎えている。例えば、仏 Varioptic 社は韓国 Samsung と共同で水溶液と油の界面の形状を電氣的に制御できる可変焦点液体レンズをカメラ付き携帯電話向けに量産している<sup>8)</sup>。

最後に、第IV章 4.5 で触れたように空間像は生理現象と密接に関わるため、表示デバイスと光学デバイスからなる光学系の設計は、結像をベースとする従来の考え方とは異なる原理に基づくものとなる。また、この原理は我が国で芽生えた超多眼の概念<sup>9)</sup>を拡張したものと考えられる。したがって、空間像形成を行う光学系の研究開発は我が国独自の3次元ディスプレイの基盤技術を創造する好機と捉えることができ、今後の発展が期待される。

#### 参考文献

- 1) 株式会社ニコン カスタムプロダクツ事業部  
[http://www.ave.nikon.co.jp/cp/products\\_opt5.html](http://www.ave.nikon.co.jp/cp/products_opt5.html)
- 2) T. Endo et.al, Proc. of SPIE vol.3957, p.225-233 (2000)
- 3) T. Sudo et.al, Proc. of SPIE vol.3957, p.215-224 (2000)
- 4) K. Inoguchi, et. al, U.S. Patent 6,061,179 (2000)
- 5) 石井源久, 宮沢 篤, 3次元画像コンファレンス 2002, p.65-68 (2002)
- 6) G. J. Woodgete et. al, EuroDisplay05 (2005)
- 7) W. L. IJzerman et. al, SID 05 DIGEST (2005)
- 8) <http://www.varioptic.com/jp/index.php>
- 9) Y. Kajiki, H. Yoshikawa, T. Honda, Proc. of SPIE vol.2652, p.106-116 (1996)

## 8 将来の展望

以上述べてきたように、現在の2眼式や多眼式を超えた自然で臨場感の高い空間像タイプの3次元ディスプレイを実現するためには、多くの光線数で多くの画像を表示する必要がある。これは、当然、デバイス技術の進歩に依存する。そこで、ここではデバイス技術の進歩の予測をもとに、空間像タイプの3次元ディスプレイの実現時期を予測してみる。

ここでは、代表的な3次元ディスプレイの構成方法として、液晶ディスプレイやプラズマディスプレイなどの薄型ディスプレイにレンチキュラーシートなどの光学素子を取り付ける構成について考える。この場合、薄型ディスプレイの画素数で、3次元表示の際の光線数が決まる。図8-1に、将来のスーパーハイビジョン放送のロードマップに沿った薄型ディスプレイの画素数推移の予測<sup>1)</sup>を示す。ただし、2015年以降は3次元用途に向けて開発が持続すると仮定している。これをもとに、3次元表示の光線数を代表的な解像度について予測した結果を図8-2に示す。2020年頃までには、ハイビジョンクラスの解像度で100本以上の光線数を有する3次元ディスプレイが実現できる可能性があることがわかる。したがって、水平パララックスタイプであれば、空間像タイプの3次元ディスプレイが実現できる可能性がある。フルパララックスタイプの実現は、2020年以降になると予想される。

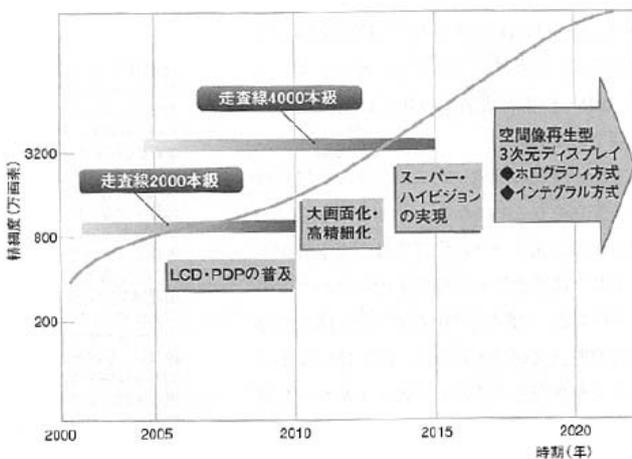


図 8-1 将来のディスプレイの画素数に関する予測<sup>1)</sup>

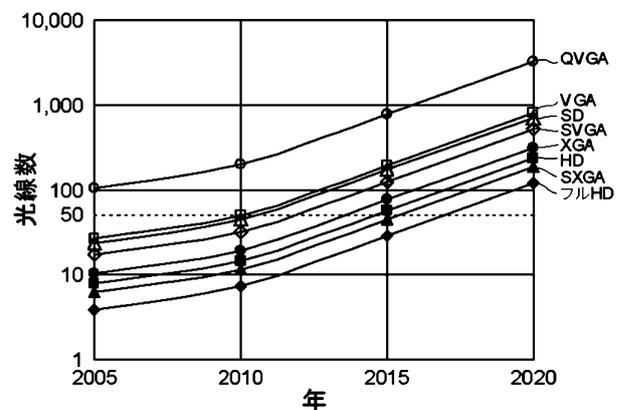


図 8-2 空間像型 3 次元ディスプレイの光線数に関する予測

つぎに、コンピュータのデータ処理能力をもとに予測してみる。図 8-3 に、CPU の処理能力の推移に関する予測を示す。ここでは、Pentium III 500 MHz (1,000 MIPS, 1999 年) を基準にしてムーアの法則を適用した。なお、ムーアの法則としては 18 ヶ月で集積度が 2 倍のペースで増加するとし、集積度に比例して処理速度も上がり、このペースが 2020 年頃までは続くとした。また、同 CPU が登場した時期が、PC で実用的に動画を扱えるよ

うになった時期に重なることから、この処理能力が動画一枚分の処理能力に対応すると仮定する。実際には、CPU の性能、画像の解像度、動画の CODEC の進歩などのさまざまな要因を考える必要があるが、2006 年に実用化が予定されている Cell プロセッサが 48 ストリームの動画を扱えるとの報告もあるので、それほど悪くない仮定であると考えられる。図 8-3 に扱える画像数の予測を同時に示してあるが、CPU の進歩は表示デバイスの進歩に比べて速く、空間像タイプの 3 次元ディスプレイが必要とするデータ処理能力が早期に実現される可能性があることを示している。

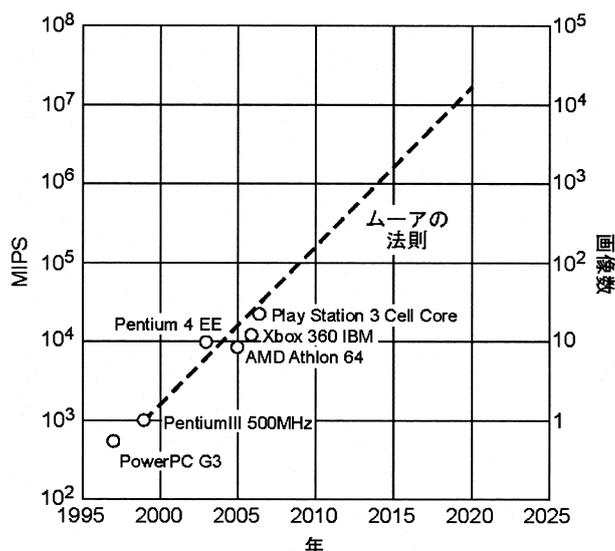


図 8-3 将来の CPU の処理能力と扱える画像数に関する予測

ここでは、かなり大胆な仮定の下に将来の空間像タイプの 3 次元ディスプレイの発展について予想した。ハイビジョンの将来のロードマップと照らし合わせて考えると、走査線 4,000 本級のスーパーハイビジョンの実用化と前後する形で水平パララックスタイプの 3 次元ディスプレイが実現され、その後、2020 年以降にフルパララックスタイプの 3 次元ディスプレイが実現されると予想される。逆に言えば、空間像タイプの 3 次元ディスプレイの研究開発は、将来の映像産業の持続的な成長を可能にすることを示している。

#### 参考文献

- 1) 奥井、3 次元ディスプレイ、NIKKEI MICRODEVICES(N0.241)、p.82-83 (7 月、2005 年)
- 2) ムーアの法則、Gordon E. Moore, "Cramming More Components Onto Integrated Circuits", Electronics, 1965 年 4 月 19 日、あるいは、  
<http://www.intel.com/jp/developer/technology/silicon/mooreslaw/index.htm>

## 第V章 結 言

結言 -----201

## 第V章 結 言

本委員会は、製造分科会、医療分科会、先端立体映像技術（アドバンス技術）分科会の3つの分科会構成となっているが、立体映像の表示システムという観点では、前2者はその利用者側から見た検討を、後者は供給者側から見た検討を行ってきた。今回の調査研究の結果、3次元情報をインタラクティブに利用するために、ヒューマンインターフェイスとして必要な立体映像表示システムに対する要望は様々であることが分かった。また立体映像表示システムの基本的性能は、ディスプレイの画素数、及びコンピューターの処理能力の増大と共に向上することが分かった。両者を関係づける具体例を、主に情報量の観点から、典型的なハイエンド、ミドルエンド、ローエンドの性能が要求される場合に分けて考察し、利用者側には今後のシステム導入に対する検討指針を、供給者側には今後の研究開発指針を提供することで、本報告書の締めくくりとしたい。

製造分野において、CAD/CAM/CAE、及び3次元レーザースキャンによって得られる3次元情報の情報量は非常に広範囲である。また目的によって、様々な要望があることは本文中に触れた通りである。ハイエンドの例として、自動車外装の意匠評価最終段階では、大きさが実物大で縦2m×横5m程度必要な他、奥行き再現精度、色、解像度に対する要求レベルも高い上に、多人数観察が必要である。単純に計算しても、2m×5mの物体を縦横共1mmの解像度で表示するには一千万点の画素数が必要であり、立体映像の実現にはその視差画像数倍のディスプレイ画素数が必要となる。そのような高解像度のディスプレイは、当面実現しないと思われる。また自動車に限らず、意匠設計の最終評価では、映像以外にも触感等が重要になる。したがって、意匠設計初期段階でのデジタルモックアップの利用は有望であり、今後増加すると予測されるが、最終的な意思決定のためのモックアップはなくなると考えられる。

製造分野におけるミドルエンドの例として、メンテナンス段階での利用を考える。機器の修理手順を指示したり、プラント等人が容易に立ち入れない場所で、ロボットの遠隔操作によって点検したりといった場面が想定されるが、装置やプラントが複雑になればなるほど奥行き情報が必要となり、立体映像の利用価値が高まると考えられる。これらの場面では、立体映像の解像度や、奥行き、色等の再現精度に対する要求仕様はそれほど高くはない。しかしながら、設計情報に基づく仮想映像と実物の重ね合わせを行うことや、疲労を軽減することなど像質以外で考慮すべき点が多い。また、様々な事象に柔軟に対応可能なインタラクティブ性が求められる。

ローエンドの例としては、社員教育や顧客へのプロモーション用途があり、立体映像の

像質は、現状のもので十分である。これらでは情報の流れはほとんど一方向であり、インタラクティブ性も問題にはならないであろう。ただし、多人数での観察が可能なことが望ましく、また疲労を感じさせず、効率的に情報提供を行うためのソフトウェア的な工夫が必要になると思われる。

医療分野における3次元情報は、多くの場合医療診断機器によって取得される。そのためその情報量はデータ取得機器によって定まる上限があり、ハイエンドの場合でも製造分野に比べると絶望的に膨大な量にはならない。具体的には、最も解像度の高いCT画像では、そのデータ取得の解像度は0.5~1mm程度である。ただし必ずしも全身のデータが必要な訳ではなく、画像診断においては特定の部位を含む体の一部分を表示できれば十分と考えられるので、500mm程度の画像サイズで満足できる。そのような立体映像を実現するディスプレイ画素数は500×500×視差画像数程度であり、視差画像数をそれほど大きくしなければ、現状でも実現されている範囲である。ただし、医療診断機器の空間分解能は今後増加する傾向にあり、それに伴って、必要となるディスプレイ画素数も増加する。

医療分野におけるミドルエンドの例として、内視鏡外科手術用途を考える。この場合、立体映像の解像度の観点では、現状の立体映像表示機器で十分である。問題点はむしろ、内視鏡が細いことから生じる、3次元情報取得の困難さや、立体映像観察による疲労にある。

ローエンドの例としては、患者に対するインフォームド・コンセントを挙げるができる。この場合、映像の内容は簡単なアニメーションでも効果があり、また短時間の観察であることから、情報量や疲労に対する問題点は少ない。現状では平面画像による3次元コンピュータグラフィクスを用いた映像を用いているが、これを立体映像とすることは比較的容易と考えられる。

このように情報量の観点では、製造分野におけるハイエンドの例を除いて、現状あるいは近い将来に実現可能なレベルである。これまで立体映像がそれほど広範に使用されてこなかった原因は、眼鏡が必要な2眼式の観察が主流であったことと思われる。今後視差数の多い空間像方式の立体映像表示装置が、使い勝手良く、低価格で得られるようになれば、製造分野、医療分野共に、3次元情報のインタラクティブな利用における立体映像の使用は急速に拡大することは間違いない。

本報告書の最後に当り、委員会及び分科会における見学、講演を快くお引き受け下さった方々、報告書の執筆にご協力下さった方々に深く感謝いたします。

KEIRIN



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

非 売 品  
禁無断転載

平 成 17 年 度  
3次元情報のインタラクティブな  
利用に関する調査研究報告書

発 行 平成18年3月  
発行者 社団法人 日本機械工業連合会  
〒105-0011  
東京都港区芝公園三丁目5番8号  
機械振興会館  
電 話 03-3434-5384

社団法人 日本オプトメカトロニクス協会  
〒105-0011  
東京都港区芝公園三丁目5番22号  
機械振興会館別館4階  
電 話 03-3435-9321