

平成13年度 研究開発成果報告書

「ブロードバンド時代の高臨場感映像コンテンツ制作技術及び高品質情報流通制御技術の研究開発」

目 次

- 1 研究開発課題の背景
- 2 研究開発分野の現状
- 3 研究開発の全体計画
 - 3-1 研究開発課題の概要
 - 3-2 研究開発目標
 - 3-2-1 最終目標(平成16年3月末)
 - 3-2-2 中間目標(平成15年3月末)
 - 3-3 研究開発の年度別計画
 - 3-4 研究開発体制
- 4 研究開発の概要(平成13年度)
 - 4-1 研究開発実施計画
 - 4-1-1 研究開発の計画内容
 - 4-1-2 研究開発課題実施計画
 - 4-2 研究開発の実施内容
- 5 研究開発実施状況(平成13年度)
 - 5-1 課題ア 高臨場感ディスプレイ(IPD)用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発
 - 5-1-1 ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術
 - 5-1-1-1 本年度の研究開発目標
 - 5-1-1-2 実施内容
 - 5-1-1-3 課題ア-1に関する研究開発実施内容のまとめ
 - 5-1-2 ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術
 - 5-1-2-1 本年度の研究開発目標
 - 5-1-2-2 実施内容
 - 5-1-2-3 課題ア-2に関する研究開発実施内容のまとめ
 - 5-1-3 ア-3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術
 - 5-1-3-1 本年度の研究開発目標
 - 5-1-3-2 実施内容
 - 5-1-3-3 課題ア-3に関する研究開発実施内容のまとめ
 - 5-1-4 ア-4 リアルタイム映像制作技術
 - 5-1-4-1 本年度の研究開発目標

5-1-4-2 実施内容

5-1-4-3 課題ア－4に関する研究開発実施内容のまとめ

5-2 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

5-2-1 イ－1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

5-2-1-1 はじめに

5-2-1-2 研究内容

5-2-1-3 他の研究機関における類似研究および協力関係状況

5-2-1-4 まとめと今後の課題

5-2-2 イ－2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

5-2-2-1 はじめに

5-2-2-2 研究内容

5-2-2-3 他の研究機関における類似研究および協力関係状況

5-2-2-4 まとめと今後の課題

5-2-3 イ－3 IPネットワークとイーサネットワークの連携技術の研究開発

5-2-3-1 はじめに

5-2-3-2 研究内容

5-2-3-3 他の研究機関における類似研究および協力関係状況

5-2-3-4 まとめと今後の課題

5-3 総括

参考文献

1 研究開発課題の背景

近年のADSL、FTTHに代表されるブロードバンドの普及により地理的、時間的、経済的な制限を受けないサービス提供が可能になってきている。一例をあげれば、教育コンテンツのVOD化、遠隔地への質の高い医療情報提供、交通情報のリアルタイム提供による渋滞緩和や在宅勤務などが身近な対象である。さらにこれらをエンハンスした利用として期待されているものに、高臨場感ディスプレイ (IPD:Immersive Projection Display) がある。この実現には現在最高の精細度を誇るハイビジョンを超えた解像度と実寸大映像の提供が不可欠である。教室に居ながらにしてミクロの世界を体験し科学の理解を深めるための利用方法や患部を目視と同等以上の解像度で実寸大に映し出すことで可能となる遠隔医療等が応用先として考えられている。IPDは高い没入感を求められる為に視野を覆い尽くす曲面への投射が一般的に行われており、バーチャルリアリティで既に活用されている。この映像を表現するデータ量は膨大になるためスタンドアロンでの使用に限られていた。

しかしながら、近年のブロードバンド化の進歩はIPDをブロードバンド時代の高臨場感ディスプレイとしての位置付けを可能にしつつある。

更に、オープン・双方向・超高速のネットワーク化の実現でIPDは様々な新応用、新市場の創出による雇用促進、経済活性化の起爆剤としての役割が期待されている。

IPDの映像となるIPD用ディジタル映像コンテンツに関しては、その制作、実施及び流通を効率的・高機能に行う技術の確立が必要となってきた。このため高付加価値・大容量データの処理技術、及びこれらのデータをネットワークで結ばれた遠隔地間で効果的に処理し、円滑に実施・流通させる超広帯域・超高品质ネットワーク制御に関する技術の研究開発を行う。

IPD用映像制作では、IPDが持つ大画面、非平面、超高精細・広視野角などといった特徴のため、テレビや従来の劇場映画等を対象とした映像制作過程では有り得なかった新たな技術課題が生じており、撮影から編集、配信、表示に至るまでのトータルなソリューションが求められる。超高精細映像の撮影機能、映像の幾何学的整合性を考慮した編集機能、映画の10倍以上にも及ぶ超大容量データの処理方法等、諸課題を克服してはじめて臨場感あふれる新しい価値を持った映像空間の提供が可能になる。また、このような高付加価値で且つ大容量のデータを、ネットワークで結ばれた遠隔地間で効率的に処理し、スムースに流通させるためには、広帯域なネットワークの実現と通信品質の確立が極めて重要である。

以上を鑑み、以下の2テーマについて研究を行う。

課題ア 高臨場感ディスプレイ (IPD) 用ディジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の
研究開発

課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

2 研究開発分野の現状

スタンダードアロンの高臨場感ディスプレイ(IPD)はビジネス実用域に達しており、下記のようなさまざまな分野で使用されている。

- ① オフィスでの大型TV会議や大画面を利用したプレゼンテーション
- ② 背景を動画の大画面としたステージ
- ③ 駅・空港などのコミュニティ広場
- ④ 監視制御室・集中運転室
- ⑤ 学校・ミュージアム

これらの場所に映し出す映像の制作手段としては、複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術として全方位映像撮影システムがあるが、既に製品化あるいはサービスとして提供されているものとして、例えば以下のものがある

- ① (株) ビュープラス (ソフトピアジャパン、岐阜大学 山本教授), S.O.S (Stereo Omni-directional System) : 60個のカメラによる全方位カメラシステム.
- ② FullView, Inc, FullView : 正多角錐形状ミラーを用いた全方位カメラシステム.
- ③ SONY (株), Fourth VIEW : 360° 映像コンテンツの制作サービス.
- ④ IMMERSIVE MEDIA, Dodeca1000Camera : 水平方向360° 垂直方向290° 12台カメラによるシステム.

他。

いずれも高価な撮影システムとなるため残念ながら普及に至っていないのが現実である。

上記のシステムは1点を中心とした全方位映像撮影システムであるが、撮影対象やスクリーン形状にフレキシブルに対応できる撮影システムが求められており、さらに複数カメラで撮影された映像の射影変換処理や1台のカメラで撮影した画像をあたかも1枚の連続した画像とする編集技術開発が必要になってきている。

高臨場感ディスプレイ(IPD)の近い将来の応用先としては、IPDを遠隔に配置し、映像、CGモデルの複製を両者で予め保有することにより、両者間の同期制御を行うことが試行されているが、未だ試行段階でありリアルタイム性が課題となっている。

高速ネット占有によるパッシブ映像伝送も試行中であるが、経済性が課題となっている。一方インターネットなどベストエフォート型のサービスを利用した場合は通信コストは安いが通信品質が保証されないという問題がある。

優先制御または帯域制御を用いた一階層の通信品質制御は従来技術としてあるが、ヘビーユーザによる帯域占有防止、複数アプリケーションの同時使用可とするため階層フロー識別型通信品質制御技術開発が必要になってきている。

3 研究開発の全体計画

3-1 研究開発課題の概要

(1) 課題ア 高臨場感ディスプレイ（IPD）用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

(1. 1) ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術

(1. 1. 1) 画像処理 並列化技術

画像の幾何変換、色変換、スクリーン形状に合わせた射影変換処理、プロジェクタ分割処理、動画圧縮処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で分散並列して行われる仕組みを実現する。

(1. 1. 2) 超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

上記画像処理を行う各PCからの、超大容量映像データの効率的なアクセス機能の実現を最終目的とし、ディスクアレイサーバと、大容量テープデバイス、ならびに前述のPCに置かれたローカルハードディスクの3デバイスを用い、実運用を考慮に入れた最適なストレージアーキテクチャおよびその管理方法の開発を行う。

(1. 2) ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

(1. 2. 1) 複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術

複数のビデオカメラを異なる方向を向くように配置し、これらによって撮影された映像の幾何変換処理を行い、お互いをシームレスに繋ぎ合わせることで、1枚の超高精細・広視野角の動画映像の取得を可能とする要素技術の開発を行う。

(1. 2. 2) 移動力カメラを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

自動走行ロボットにカメラを取り付け、あらかじめ与えられた経路に沿って映像を撮影し撮影された映像をmosaicing (stitching) 処理により、擬似的にシームレスに接続する手段を実現する、システム設計、基本アルゴリズムの開発・評価を行う。

(1. 3) ア-3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

(1. 3. 1) 映像編集情報管理方式の研究

スクリーン形状やプロジェクト構成の違いに対応する IPD 固有の映像編集処理についての具体アルゴリズムの開発と、処理全体を効率的に管理するためのシステムアーキテクチャの設計を行い、課題ア - 1 で開発するプロトシステムに反映させ、評価を行う。

(1. 3. 2) カメラワーク管理方式の研究

撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）情報を、映像データに合わせて記録・管理する効果的な手法に関する基礎検討を行い、これを課題ア - 1、および課題ア - 2 で開発するプロトシステムに連携させ、評価を行う。

(1. 3. 3) 実験コンテンツの制作

課題ア - 1、課題ア - 2、ならびに上記（1）（2）で開発した技術・プロトシステムを用い、IPD ディスプレイに表示する映像コンテンツを制作し、開発技術の検証を行う。

(1. 4) ア - 4 リアルタイム映像制作技術

(1. 4. 1) 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術

上記課題ア - 2 で挙げた各開発技術の、リアルタイム化を実現するためのアーキテクチャの検討、システム設計、実装方法の検討・開発を行う。

(1. 4. 2) マルチカメラによる遠隔監視システム プロトタイプの開発

課題アおよび課題イを組み合わせたアプリケーション技術の検討ならびに検証を目的とした実験アプリケーションシステム プロトタイプを開発する。

(2) 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

(2. 1) イ - 1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

(2. 1. 1) 通信品質制御技術

通信するコンテンツに対応し、ネットワークのEnd-to-Endでの通信品質を制御する技術の開発のため、下記項目の検討・設計・プロトシステム開発を行う。

- ① レイヤ2およびレイヤ3レベルでの通信ノード（スイッチ、ルータ等）におけるアプリケーション対応フロー識別方法の検討及び設計
- ② 通信ノード（スイッチ、ルータ等）でのアプリケーション対応フロー識別を可能にする制御プロトプログラムの開発

(2. 1. 2) アプリケーション対応通信品質制御技術

アプリケーションとして超大容量映像データ配信システム（放送型）を想定し、超大容量映像データの通信トラヒックと、該映像データ放送の複数観客からの反応情報返送トラヒックが混在する場合の、各トラヒックに対する通信品質制御技術の開発のため、下記項目の検討・設計・プロトシステム開発を行う。

- ① 従来の通信レイヤ（レイヤ3以下）の通信品質制御に加え、通信データの情報処理を含む上位レイヤでの通信品質制御方式の検討
- ② ネットワーク上に配備する上位レイヤでの通信品質制御対応情報処理サーバの配備方式の検討及び設計
- ③ 情報処理サーバのプロトプログラム開発

(2. 2) イー2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

(2. 2. 1) イーサネットにおける通信品質制御、管理技術

今後の高速広域ネットワークの主流になると予想される広域イーサネットにおける通信品質制御、管理技術を開発するため、下記項目の検討・設計・プロトシステム開発を行う。

- ① 通信品質保証ネットワーク管理装置からイーサネットワークを管理するために必要な、イーサスイッチのリモート制御について、ワイドエリアおよびローカルエリア・イーサスイッチの機種に依存しない制御方式の設計
- ② 通信品質保証ネットワーク管理装置のプロトシステム開発

(2. 3) イー3 IPネットワークとイーサネットワークの連携技術の研究開発

(2. 3. 1) IPネットワークとイーサネットワークの通信品質制御連携技術

IPネットワークとイーサネットワークが接続され、かつ、レイヤ3以下の通信品質制御とレイヤ4以上の通信品質制御が連携する次世代のネットワークサービス対応通信品質制御技術を開発するため、下記項目の調査・検討を行う。

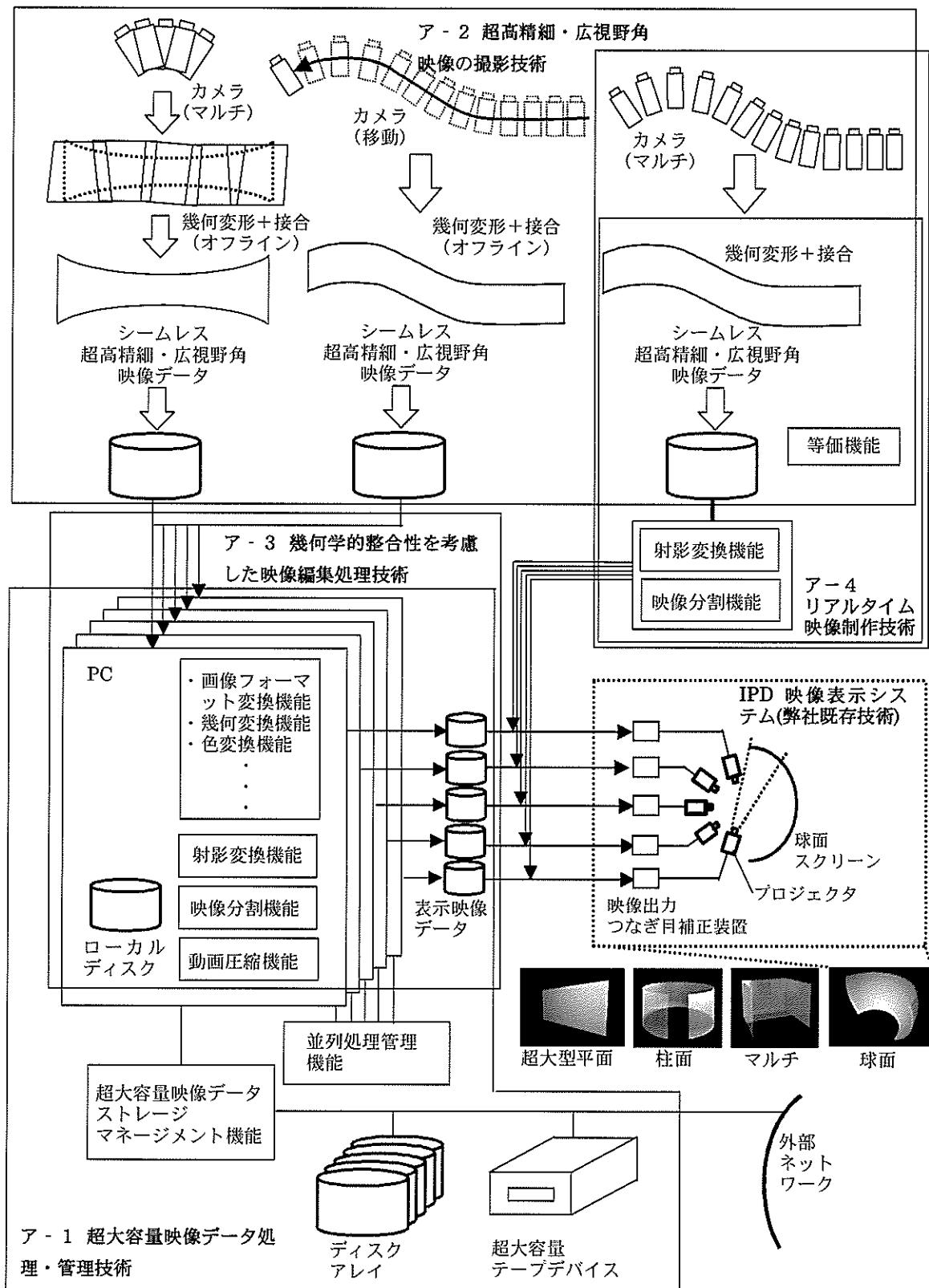
- ① 超大容量映像データを駆使する次世代ネットワークサービスの調査
- ② IPネットワークとイーサネットワークの通信品質制御連携方式の検討
- ③ 情報処理機能と通信品質保証機能を有する次世代ネットワークの機能要件及び連携方式検討

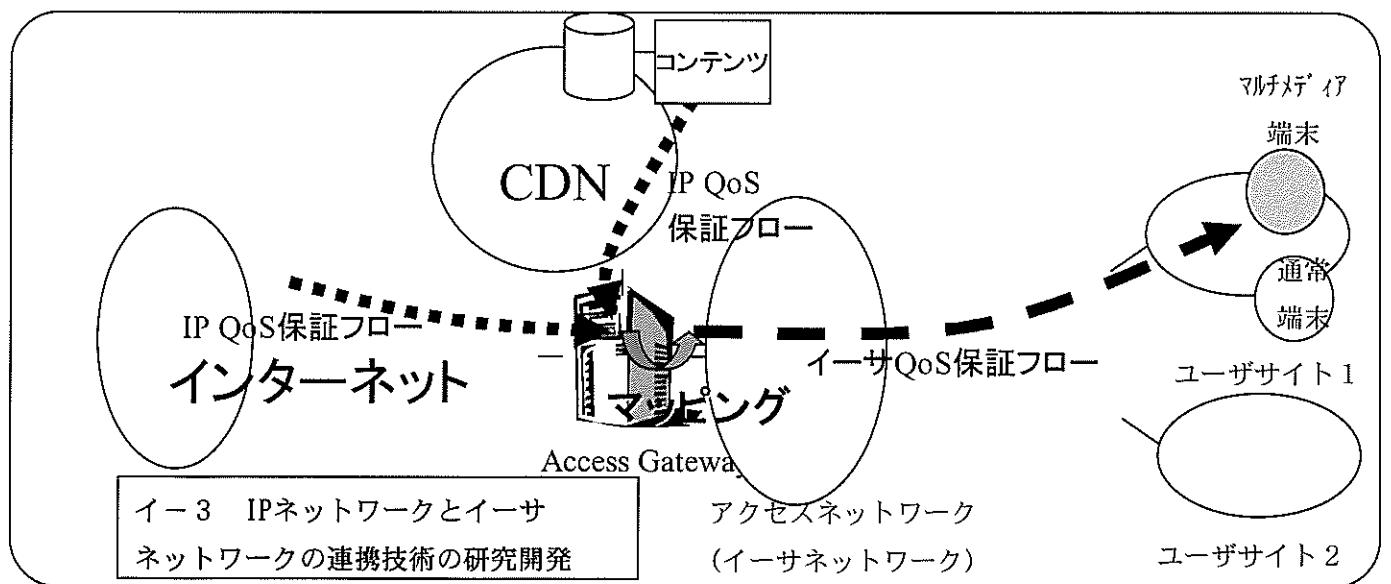
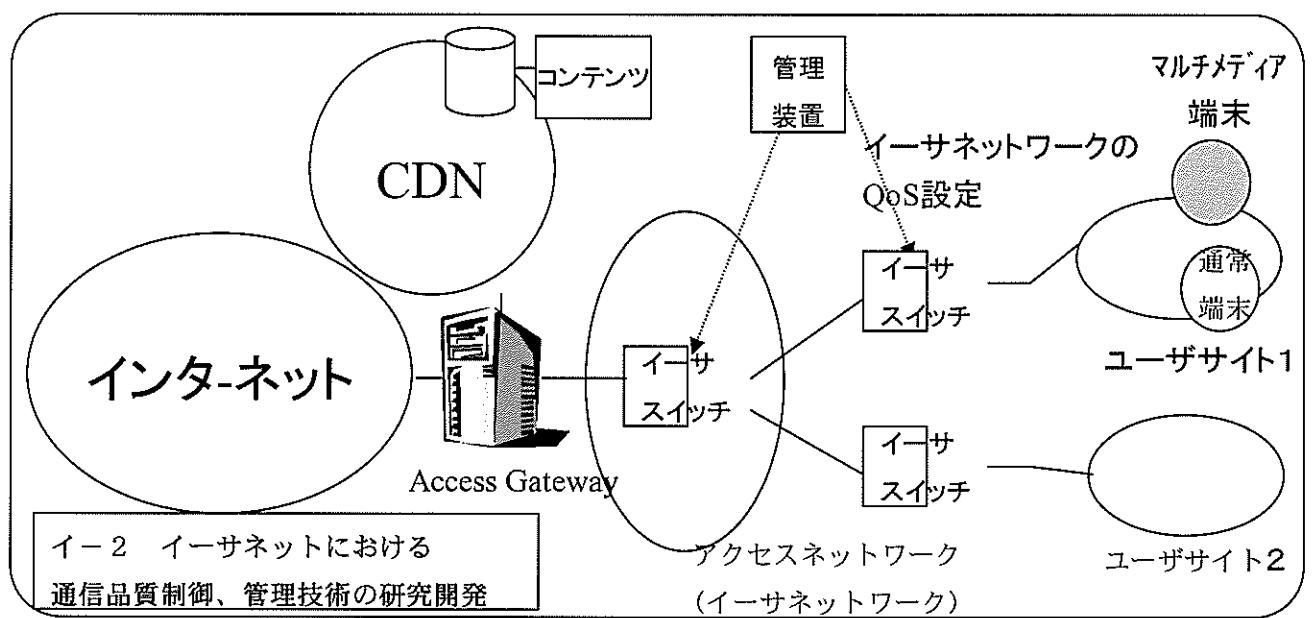
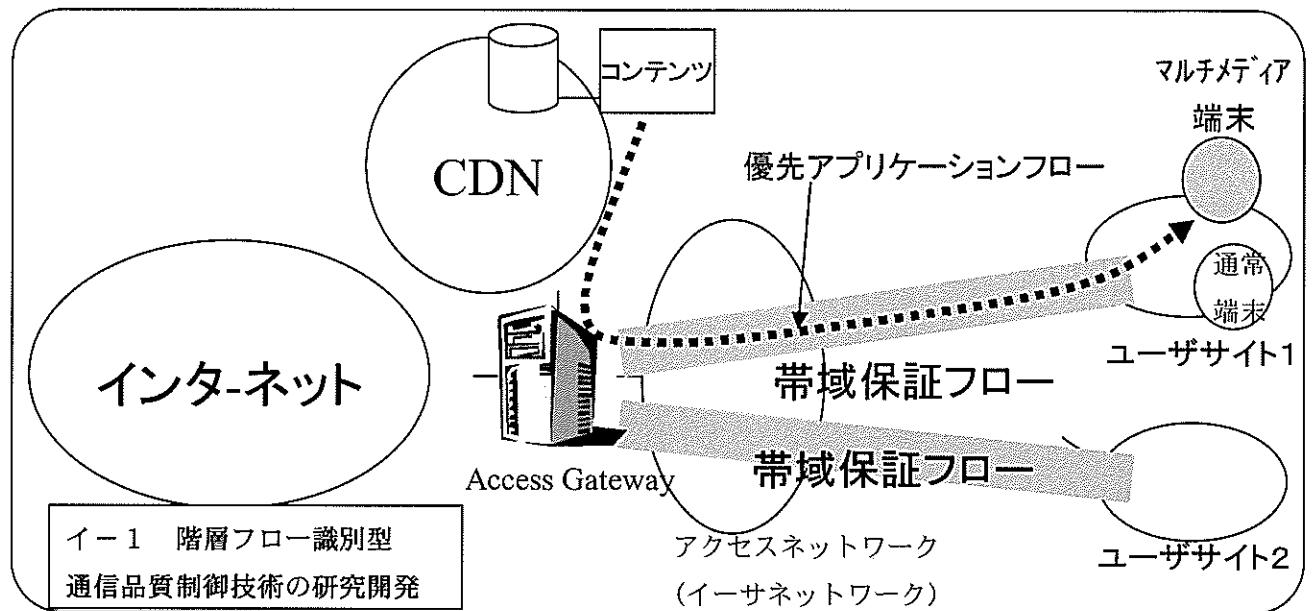
(2. 3. 2) IPネットワークとイーサネットワークの通信品質制御連携技術

イーサスイッチ制御方式及びイーサネットワーク管理装置の実装方式の検討を行う。

次にIPネットワークとイーサネットワークが接続され、かつ、レイヤ3以下の通信品質

制御とレイヤ4以上の通信品質制御が連携する次世代のネットワークサービス対応通信品質制御技術について調査・検討を行う。





3-2 研究開発目標

3-2-1 最終目標（平成16年3月末）

高臨場感ディスプレイ(IPD)用デジタル映像コンテンツ制作環境プロトシステム構築と、それを使用したテストコンテンツの作成、および、同コンテンツを高品質に伝送可能とするネットワーク制御技術の確立を目指とする。各々の項目に対する目標を以下に示す。

(1) 課題ア 高臨場感ディスプレイ(IPD)用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

(1. 1) ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術

(1. 1. 1) 画像処理並列化技術

画像の幾何変換、色変換、スクリーン形状に合わせた射影変換処理、プロジェクト分割処理、動画圧縮処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で分散並列して行われる仕組みを実現する。プロトシステムにおいてPCは10台～20台程度を想定するが、50台以上の構成にも対応可能な設計とする。

またその実現においては、下記の技術を確立し取り入れるものとする。

- ① 処理の効率的なスケジュール管理
- ② ネットワーク転送、データ読み込み・書き出し、計算処理等の個別処理間のボトルネックを解消する最適な処理のスケジュール管理
- ③ 処理をビジュアルに一元管理できるジョブ管理とそのGUI表示

上記機能を持つプロトシステムを開発し、評価を行う。

(1. 1. 2) 超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

500GB以上の画像データを、上記画像処理を行う各PCから効率的に読み出し・書き込みできる仕組みを確立する。具体的には、ディスクアレイサーバと、大容量テープデバイス、ならびに前述の各PCに置かれたローカルハードディスクの3デバイスを用い、実運用を考慮に入れた最適なアーキテクチャおよびその管理方法を確立する。

さらに、同アーキテクチャにおいて、ストレージ機器の故障や、操作者の操作ミス等によって映像データの一部が失われるなどの事故が生じた場合でも、速やかに現状復帰できるように機能する、フェイルセーフ技術についても合わせて検討を加え、設計に取り入れるものとする。

以上の技術を確立し、実機によるプロトシステムを開発し、評価を行う。

(1. 2) ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

(1. 2. 1) 複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術

複数のビデオカメラを異なる方向を向くように配置し、これらによって撮影された映像の射影変換処理を行い、お互いをシームレスに繋ぎ合わせることで、1枚の超高精細・広視野角の映像を取得するための基礎技術を開発する。なお、同システムは、実質的に NTSC 解像度を持つ5台以上のカメラより構成されるものを想定する。

(1. 2. 2) 移動カメラを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、幾何変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続することで、目的となる超高精細な静止画像を取得する技術を確立する。具体的には下記を目標とする。

- ① 5以上の中程度の自由度を持つハンドロボットにビデオカメラを取り付け、ロボットコントロールにより任意の位置・方向の映像を撮影し、撮影された映像を mosaicing (stitching) 処理により、擬似的にシームレスに接続する手段を開発する。本手段を実現する、システム設計、基本アルゴリズムの開発および試作を完了し、実証実験を行う。
- ② 自動走行ロボットにカメラを取り付け、あらかじめ与えられた経路に沿って映像を撮影する。撮影された映像を mosaicing (stitching) 処理により、擬似的にシームレスに接続する手段を開発する。本手段を実現する、システム設計、基本アルゴリズムの開発および試作を完了し、実証実験を行う。

(1. 3) ア - 3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

(1. 3. 1) 映像編集情報管理方式の研究

映像制作・編集過程における、合成・変形等の処理フローを、出力映像の表示環境の特性に依存する部分と、非依存な部分に分けて定義し、処理・管理可能な映像編集システムを設計する。映像表示環境固有のパラメータデータがあたえられたときに、映像解像度、スクリーン形状、プロジェクタの特性、映像再生方式など、映像表示環境の特性に対応した仕様の映像として加工し、出力可能なものとする。

本設計内容を、課題ア - 1 で開発するプロトシステムに反映させ、評価を行う。

(1. 3. 2) カメラワーク管理方式の研究

撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）などの情報を、映像データに合わせて記録し、映像編集時や表示に、その情報を効果的に利用できる仕組みについての検討・開発を行い、これを課題ア - 1、および課題ア - 2 で開発するプロトシステムに連携させ、評価を行う。

(1. 3. 3) 実験コンテンツの制作

課題ア - 1、課題ア - 2、ならびに上記(1) (2)で開発した技術・プロトシステムを用い、

IPD ディスプレイに表示する映像コンテンツを制作し、開発技術の検証を行う。

(1. 4) ア - 4 リアルタイム映像制作技術

(1. 4. 1) 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術

上記課題ア - 2 で挙げた開発技術の、リアルタイム化を試みる。複数のカメラの撮影映像に対し、スクリーン上で擬似的にシームレスに接続されて表示されるような適切な幾何変換を、リアルタイムに行う仕組みを開発する。以上を実現するための画像変換パラメータを算出するキャリブレーション技術、ならびにその変換パラメータに従い、撮影データをリアルタイムに変換する機能を開発する。

(1. 4. 2) マルチカメラによる遠隔監視システム プロトタイプの開発

上記開発技術の効果的利用のための、アプリケーション技術の検討およびその検証を目的とした実験アプリケーションを開発する。

IPD 映像表示システムにてリアルタイム表示できるまでのトータルな実験システムを構築する。本システムにより、開発技術の検証を行う。

(2) 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

(2. 1) イー 1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

ギガビットイーサネットインターフェースを有するアクセスゲートウェイのプロトタイプを開発し、以下の仕様を満たす技術を確立する。

- ① 2階層以上のフローを識別し、それぞれの階層のフローに対して通信品質制御を行うこと
- ② 通信品質保証制御は、優先制御および帯域制御が可能であること
- ③ 1000フロー以上の通信品質制御の設定、管理が可能であること
- ④ フローの最大帯域は100Mbpsが可能であること

(2. 2) イー 2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

イーサネットワークの通信品質制御を行う管理サーバのプロトタイプを開発し、以下の仕様を満たす技術を確立する。

- ① 管理サーバより複数のイーサスイッチの設定を行い、通信品質制御が可能であること
- ② 1 フローの設定が5秒以内に終了すること
- ③ 1000フロー以上の通信品質制御の設定、管理が可能であること

(2. 3) イー 3 IPネットワークとイーサネットワークの連携技術の研究開発

イー 1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発において開発したアクセスゲートウェイにおいて、以下の仕様を満たす技術を確立する。

- ① IPレベルの通信品質制御とイーサネットレベルの通信品質制御のマッピングが可能であること
- ② 1物理回線上の1000以上のフローに対して、IPレベルの通信品質制御とイーサネットレベルの通信品質制御のマッピングが可能であること

3-2-2 中間目標（平成15年3月末）

（1）課題ア 高臨場感ディスプレイ（IPD）用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

（1. 1）ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術

（1. 1. 1）画像処理並列化技術

画像の幾何変換、色変換、射影変換処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で、効率的に分散並列して行われる仕組みの開発のため、下記項目の検討・設計を実施する。

- ① 全体アーキテクチャの検討、設計
- ② 映像編集・制作に必要となる画像処理ライブラリの開発（ただし次年度にも継続）
- ③ 処理の効率的なスケジュール管理手法の検討
- ④ 処理をビジュアルに一元管理できるジョブ管理とそのGUI表示方法の検討、設計

（1. 1. 2）超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

超大容量映像データを、上記画像処理を行う各PCから、効率的に読み出し、および書き込みできる仕組みの実現を最終目的とし、ディスクアレイサーバと、大容量テープデバイス、ならびに前述のPCに置かれたローカルハードディスクの3デバイスを用い、実運用を考慮に入れた最適なストレージアーキテクチャおよびその管理方法の検討を行う。

（1. 2）ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

（1. 2. 1）複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術

複数のビデオカメラを異なる方向を向くように配置し、これらによって撮影された映像の幾何変換処理を行い、お互いをシームレスに繋ぎ合わせることで、1枚の超高精細・広視野角の動画映像の取得を可能にする映像撮影技術および映像変換技術の基礎検討を行う。

（1. 2. 2）移動式ロボットを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

- ① ハンドロボットにビデオカメラを取り付け、任意の位置・方向の映像を撮影し、撮影された映像をmosaicing(stitching)処理により擬似的にシームレスに接続する機能を実現するための基礎検討を行う。
- ② 自動走行ロボットにカメラを取り付け、あらかじめ与えられた経路に沿って映像を撮影し、

撮影された映像を mosaicing (stitching) 処理により擬似的にシームレスに接続する機能を実現するための基礎技術検討を行う。

(1. 3) ア - 3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

(1. 3. 1) 映像編集情報管理方式の研究

3次元幾何学的拘束条件を考慮した、IPD の特殊性に基づく映像制作・編集技術の基礎検討を行う。

(1. 3. 2) カメラワーク管理方式の研究

撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）などの情報を、映像データに合わせて記録し、映像編集時や表示に、その情報を効果的に利用できる仕組みについての基礎検討を行う。

(1. 3. 3) 実験コンテンツの制作

平成15年度に開発する実験コンテンツの、シナリオ、撮影方法、撮影手段などについての基礎検討を行う。

(1. 4) ア - 4 リアルタイム映像制作技術

(1. 4. 1) 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術

上記課題ア - 2 で挙げた開発技術の、リアルタイム化を実現するためのアーキテクチャの検討、実装方法の検討を行う。

(1. 4. 2) マルチカメラによる遠隔監視システム プロトタイプの開発

平成15年度に開発する遠隔監視システムプロトタイプ開発のための基礎検討を行い概念設計書を完成させる。

(2) 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

(2. 1) イ - 1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

(2. 1. 1) 通信品質制御技術

通信するコンテンツに対応し、ネットワークのEnd-to-Endでの通信品質を制御する技術の開発のため、下記項目の検討・設計・プロトシステム開発を実施する。

- ① レイヤ2およびレイヤ3レベルでの通信ノード（スイッチ、ルータ等）におけるアプリケーション対応フロー識別方法の検討及び設計を完了し、設計仕様書を作成する。

- ② 通信ノード（スイッチ、ルータ等）でのアプリケーション対応フロー識別を可能にする制御プロトプログラムの開発を完了する。

(2. 1. 2) アプリケーション対応通信品質制御技術

アプリケーションとして超大容量映像データ配信システム（放送型）を想定し、超大容量映像データの通信トラヒックと、該映像データ放送の複数観客からの反応情報返送トラヒックが混在する場合の、各トラヒックに対する通信品質制御技術の開発のため、下記項目の検討・設計・プロトシステム開発を実施する。

- ① 従来の通信レイヤ（レイヤ3以下）の通信品質制御に加え、通信データの情報処理を含む上位レイヤでの通信品質制御方式の検討を完了する。
- ② ネットワーク上に配備する上位レイヤでの通信品質制御対応情報処理サーバの配備方式の検討及び設計を完了し、設計仕様書を作成する。
- ③ 情報処理サーバのプロトプログラム開発を完了する。

(2. 2) イー2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

(2. 2. 1) イーサネットにおける通信品質制御、管理技術

今後の高速広域ネットワークの主流になると予想される広域イーサネットにおける通信品質制御、管理技術を開発するため、下記項目の検討・設計・プロトシステム開発を実施する。

- ① 通信品質保証ネットワーク管理装置からイーサネットワークを管理するために必要な、イーサスイッチのリモート制御について、ワイドエリアおよびローカルエリア・イーサスイッチの機種に依存しない制御方式の設計を完了し、設計仕様書を作成する。
- ② 通信品質保証ネットワーク管理装置のプロトシステムの開発を完了する。

(2. 3) イー3 IPネットワークとイーサネットワークの連携技術の研究開発

(2. 3. 1) IPネットワークとイーサネットワークの通信品質制御連携技術

IPネットワークとイーサネットワークが接続され、かつ、レイヤ3以下の通信品質制御とレイヤ4以上の通信品質制御が連携する次世代のネットワークサービス対応通信品質制御技術を開発するため、下記項目の調査・検討を実施する。

- ① 超大容量映像データを駆使する次世代ネットワークサービスの調査を完了する。
- ② IPネットワークとイーサネットワークの通信品質制御連携方式の検討を完了する。
- ③ 情報処理機能と通信品質保証機能を有する次世代ネットワークの機能要件及び連携方式の検討を完了し、基本検討書を作成する。

3-3 研究開発の年度別計画

(1) 課題ア 高臨場感ディスプレイ（IPD）用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

(1. 1) ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術

(1. 1. 1) 画像処理 並列化技術

平成13年度は画像の幾何変換、色変換、射影変換処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で、効率的に分散並列して行われる仕組みの開発のため調査、設備の選定・調達を行う。平成14年度は画像の幾何変換、色変換、スクリーン形状に合わせた射影変換処理、プロジェクト分割処理、動画圧縮処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で分散並列して行われる仕組みの検討・設計を行う。平成15年度はプロトシステムの評価を行う。

(1. 1. 2) 超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

平成13年度は超大容量映像データを効率的に保存・管理する技術開発に必要となる、ディスクアレイ、テープデバイス、ネットワーク機器等、設備の選定と調達を行う。平成14年度は超大容量映像データを、上記画像処理を行う各PCから、効率的に読み出し、および書き込みできることを最終目的とし、ディスクアレイサーバと、大容量テープデバイス、ならびに前述のPCに置かれたローカルハードディスクの3デバイスを用い、実運用を考慮に入れた最適なストレージアーキテクチャおよびその管理方法の検討を行う。平成15年度はプロトシステムの評価を行う。

(1. 2) ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

(1) 複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術

平成13年度は複数のビデオカメラで撮影された映像の射影変換処理によって1枚の超高精細・広視野角の映像を取得する技術の開発のための調査・準備を行う。平成14年度は複数のビデオカメラを異なる方向を向くように配置し、これらによって撮影された映像の幾何変換処理を行い、お互いをシームレスに繋ぎ合わせることで、1枚の超高精細・広視野角の動画映像の取得を可能にするカメラシステムの基礎検討を行う。平成15年度はその実現に必要となる要素技術の開発を行う。

(2) 移動カメラを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

平成13年度は移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、射影変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続する技術の開発に必要となる、カメラ、ロボット等、実験・開発設備の選定と調達を行う。平成14年度は自動走行ロボットにカメラを取り付け、あらかじめ与えられた経路に沿って映像を撮影し撮影された映像を mosaicing (stitching) 処理により、擬似的にシームレスに接続する手段を実現するための、システム設計、基本アルゴリズムの開発を行う。平成15年度はその実機による実験を行う。

(1. 3) ア - 3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

(1. 3. 1) 映像編集情報管理方式の研究

平成13年度は映像制作・編集過程におけるIPD固有の処理技術の開発のための検討・調査を行う。平成14年度はスクリーン形状やプロジェクタ構成の違いに対応するIPD固有の映像編集処理についての具体アルゴリズムの開発と、処理全体を効率的に管理するためのシステムアーキテクチャの設計を行い、課題ア-1で開発するプロトシステムに反映させる。平成15年度はプロトシステムの評価を行う。

(1. 3. 2) カメラワーク管理方式の研究

平成13年度は撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）の扱い方法に関する既存技術の調査を行う。平成14年度は撮影時のカメラパラメータの情報を、映像データに合わせて記録・管理する効果的な手法に関する基礎検討を行い、これを課題ア-1、および課題ア-2で開発するプロトシステムに連携させる。平成15年度はプロトシステムの評価を行う。

(1. 3. 3) 実験コンテンツの制作

課題ア-1、2、3の検証を目的とし平成14年度は平成15年度に開発する実験コンテンツについて、シナリオ、撮影方法、撮影対象、表示方法などの検討を行う。平成15年度は課題ア-1、課題ア-2、ならびに上記(1)(2)で開発した技術・プロトシステムを用い、IPDディスプレイに表示する映像コンテンツを制作する。

(1. 4) ア - 4 リアルタイム映像制作技術

(1. 4. 1) 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術

平成13年度は上記課題ア-2で挙げた開発技術のリアルタイム化を試みるための、実験設備の選定と調達を行う。平成14年度はそのアーキテクチャの検討、システム設計、実装方法の検討・開発を行う。平成15年度は開発技術の検証を行う。

(1. 4. 2) マルチカメラによる遠隔監視システム プロトタイプの開発

平成13年度はアプリケーション技術の検討およびその検証を目的とした実験デモンストレーションシステムの全体構想策定ならびに、主要設備の選定と調達を行なう。平成14年度は全体システムの設計および、実装に際し必要となる応用技術の検討と開発を行う。平成15年度は検証を行う。

(2) 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

(2. 1) イー1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

(2. 1. 1) 通信品質制御技術

平成13年度は次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行う。

平成14年度は通信するコンテンツに対応し、ネットワークのEnd-to-Endでの通信品質を制御する技術の開発のため、プロトシステム開発を行う。平成15年度はプロトシステムの評価を行う。

(2. 1. 2) アプリケーション対応通信品質制御技術

平成13年度は通信品質制御方式の階層フローの定義および検出手段及び階層フロー通信品質制御機能の実装方式案について検討する。

平成14年度はアプリケーションとして超大容量映像データ配信システム（放送型）を想定し、超大容量映像データの通信トラヒックと、該映像データ放送の複数観客からの反応情報返送トラヒックが混在する場合の、各トラヒックに対する通信品質制御技術の開発のため、プロトシステム開発を行う。平成15年度はプロトシステムの評価を行う。

(2. 2) イー2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

(2. 2. 1) イーサネットにおける通信品質制御、管理技術

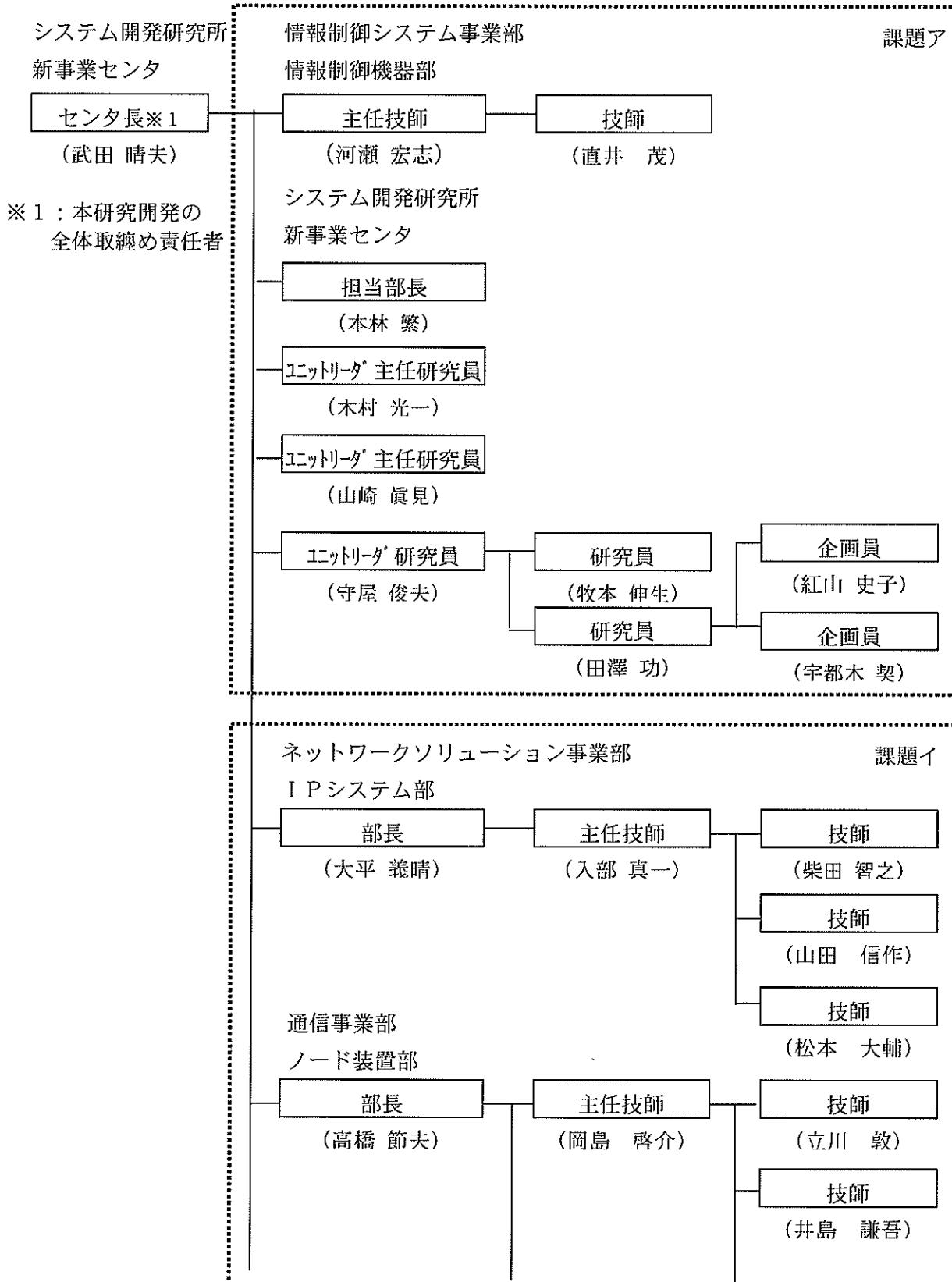
平成13年度は次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行う。平成14年度は今後の高速広域ネットワークの主流になると予想される広域イーサネットにおける通信品質制御、管理技術を開発するため、プロトシステム開発を行う。平成15年度はプロトシステムの評価を行う。

(2. 3) イー3 IPネットワークとイーサネットワークの連携技術の研究開発

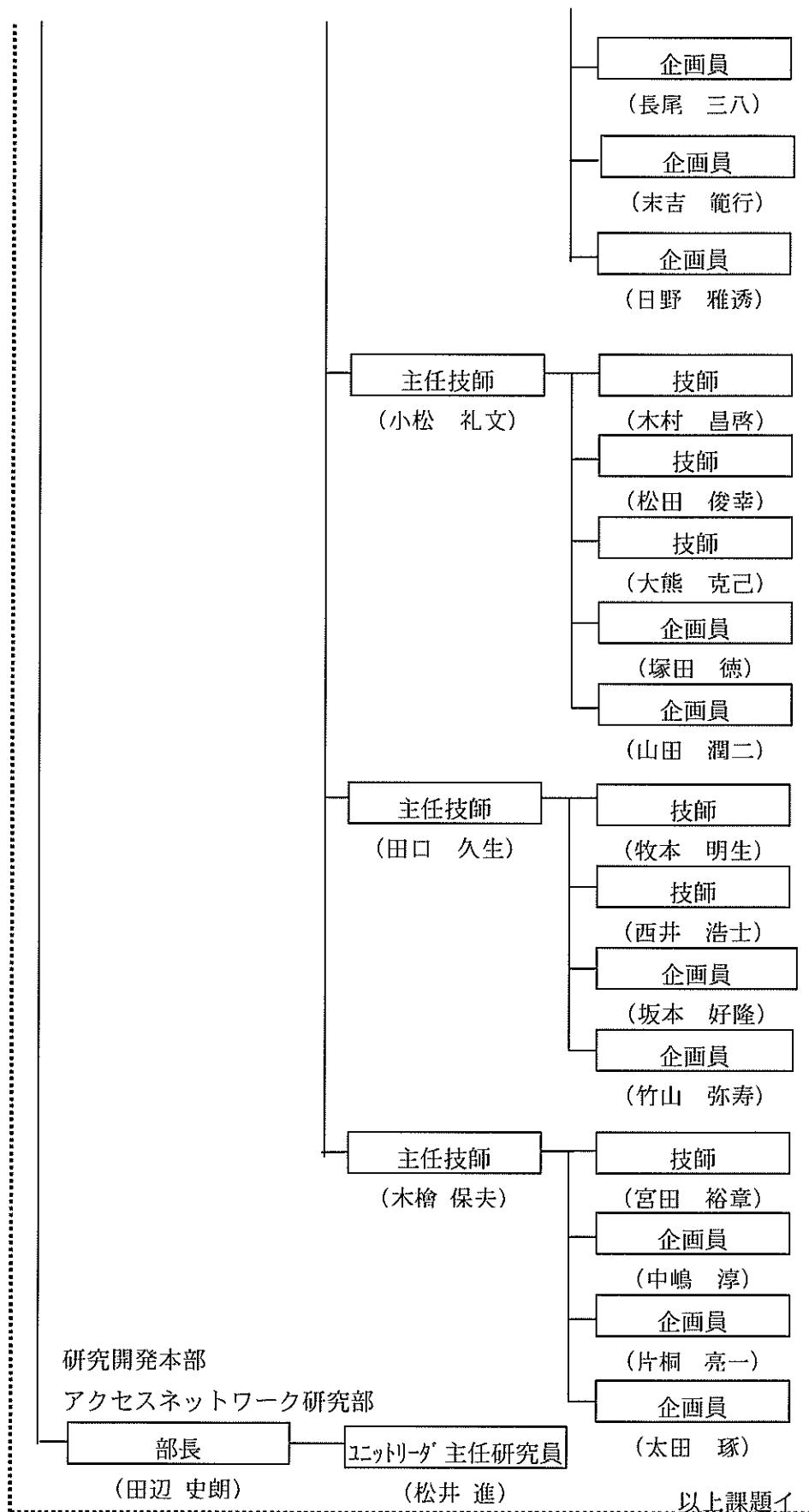
(2. 3. 1) IPネットワークとイーサネットワークの通信品質制御連携技術

平成13年度はイーサスイッチ制御方式及びイーサネットワーク管理装置の実装方式案の検討を行う。平成14年度はIPネットワークとイーサネットワークが接続され、かつ、レイヤ3以下の通信品質制御とレイヤ4以上の通信品質制御が連携する次世代のネットワークサービス対応通信品質制御技術について調査・検討のうえ開発を行う。平成15年度は開発技術の検証を行う。

3-4 研究開発体制



一次ページに続く→



4 研究開発の概要（平成13年度）

4-1 研究開発実施計画

4-1-1 研究開発の計画内容

（1）課題ア 高臨場感ディスプレイ（IPD）用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

平成13年度は、平成14年度に行う中間目標までの研究開発に先立ち、課題項目の詳細化、既存技術調査、主要研究設備の調達等を行う。

（1. 1）ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術

（1. 1. 1）画像処理並列化技術

画像の幾何変換、色変換、射影変換処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で、効率的に分散並列して行われる仕組みの開発のため、下記項目の検討・準備を行う。

- ① 並列化可能な画像処理項目の列挙
- ② 同 実装に必要となるアルゴリズム等についての公知技術の調査
- ③ 同 処理を実装するPC等設備の選定と調達

（1. 1. 2）超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

超大容量映像データを効率的に保存・管理する技術開発に必要となる、ディスクアレイ、テープデバイス、ネットワーク機器等、設備の選定と調達を行う。

（1. 2）ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

（1. 2. 1）複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術

複数のビデオカメラで撮影された映像の射影変換処理によって1枚の超高精細・広視野角の映像を取得する技術の開発のため、下記項目の調査・準備を行う。

- ① 複数のビデオカメラを用いた映像撮影に関する公知技術の調査
- ② ビデオカメラ等の実験設備の選定と調達

（1. 2. 2）移動カメラを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、射影変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続する技術の開発に必要となる、カメラ、ロボット等、実験・開発設備の選定と調達を行う。

(1. 3) ア - 3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

(1. 3. 1) 映像編集情報管理方式の研究

映像制作・編集過程におけるIPD固有の処理技術の開発のため、下記項目の検討・調査を行う。

- ① スクリーン形状やプロジェクタ構成の違いに対応する IPD 固有の映像編集処理と、それに関する諸課題の列挙
- ② 課題解決に必要となる既存技術の調査

(1. 3. 2) カメラワーク管理方式の研究

撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）の扱い方法に関する既存技術の調査を行う。

(1. 3. 3) 実験コンテンツの制作

本年度は、本項目に関する研究開発は実施しない。

(1. 4) ア - 4 リアルタイム映像制作技術

(1. 4. 1) 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術

上記課題ア - 2 で挙げた開発技術の、リアルタイム化を試みるための、実験設備の選定と調達を行う。

(1. 4. 2) マルチカメラによる遠隔監視システム プロトタイプの開発

アプリケーション技術の検討およびその検証を目的とした実験アプリケーションを開発するため、下記項目の検討・準備を行う。

- ① 実験デモンストレーションシステムの全体構想策定
- ② 主要設備の選定と調達

(2) 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

平成13年度は、平成14年度の機能設計、詳細設計およびプロトタイプ実装に先立って、技術調査、方式検討、および主要研究設備の調達等を行う。

(2. 1) イー 1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

(2. 1. 1) 次世代ネットワークサービスの通信品質制御に対する要求条件の研究

次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行う。

- ① 今後要求されるコンテンツ対応の通信品質に関する調査と整理
- ② ネットワークのEnd-to-Endの通信品質制御技術に関する調査と整理
- ③ 実験設備の調達ならびにネットワーク構築

(2. 1. 2) 通信品質制御方式の研究・開発

通信品質制御方式の下記項目について検討を実施する。

- ① 階層フローの定義および検出手段の検討

フローの検出に用いる情報として、送信/受信回線、イーサヘッダ情報、IPヘッダ情報、TCP/UDPヘッダ情報などが考えられる。

ここでは、サービス利用者の観点より要求条件を明確にし、フローの定義および階層化方式の検討を行う。

- ② 階層フロー通信品質制御機能の実装方式

アクセスゲートウェイのプロトタイプ実装方式を検討する。

(2. 2) イー2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

(2. 2. 1) 次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件の整理

以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行う。

- ① IPルータにおける通信品質制御技術の調査と整理
- ② イーサスイッチにおける通信品質制御技術の調査と整理
- ③ 実験設備の調達ならびにネットワーク構築

(2. 2. 2) イーサネットにおける通信品質制御・管理方式の検討

- ① イーサスイッチ制御方式

管理装置からイーサネットワークを管理するために必要な、イーサスイッチのリモート制御について、既存イーサスイッチの通信制御技術の調査結果を受けて、適切な制御方式および使用方式について検討する。

- ② イーサネットワーク管理装置の実装方式

イーサネットワーク管理装置のプロトタイプ実装方式を検討する。

(2. 3) イー3 IPネットワークとイーサネットワークの連携技術の研究開発

次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため以下の既存技術調査・整理を行う。

- ① IPネットワークとイーサネット、ATMなどのLayer2ネットワークの連携による通信品質制御技術の調査と整理

4-1-2 研究開発課題実施計画

(1) 課題ア 高臨場感ディスプレイ(IPD)用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

(1. 1) ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術

(1. 1. 1) 画像処理 並列化技術

平成13年度は画像の幾何変換、色変換、射影変換処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で、効率的に分散並列して行われる仕組みの開発のため調査、設備の選定・調達を行う。

(1. 1. 2) 超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

平成13年度は超大容量映像データを効率的に保存・管理する技術開発に必要となる、ディスクアレイ、テープデバイス、ネットワーク機器等、設備の選定と調達を行う。

(1. 2) ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

(1. 2. 1) 複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術

平成13年度は複数のビデオカメラで撮影された映像の射影変換処理によって1枚の超高精細・広視野角の映像を取得する技術の開発のための調査・準備を行う。

(1. 2. 2) 移動カメラを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

平成13年度は移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、射影変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続する技術の開発に必要となる、カメラ、ロボット等、実験・開発設備の選定と調達を行う。

(1. 3) ア-3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

(1. 3. 1) 映像編集情報管理方式の研究

平成13年度は映像制作・編集過程におけるIPD固有の処理技術の開発のための検討・調査を行う。

(1. 3. 2) カメラワーク管理方式の研究

平成13年度は撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位

置、レンズ歪みなど)の扱い方法に関する既存技術の調査を行う。

(1. 3. 3) 実験コンテンツの制作

平成13年度は課題ア-1、2、3の検証を目的とし平成15年度に開発する実験コンテンツについて、シナリオ、撮影方法、撮影対象、表示方法などの検討を行う。

(1. 4) ア-4 リアルタイム映像制作技術

(1. 4. 1) 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術

平成13年度は上記課題ア-2で挙げた開発技術の、リアルタイム化を試みるための、実験設備の選定と調達を行う。

(1. 4. 2) マルチカメラによる遠隔監視システム プロトタイプの開発

平成13年度はアプリケーション技術の検討およびその検証を目的とした実験デモンストレーションシステムの全体構想策定ならびに、主要設備の選定と調達を行なう。

(2) 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

(2. 1) イ-1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

(2. 1. 1) 次世代ネットワークサービスの通信品質制御に対する要求条件の研究

平成13年度は次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行う。

- ① 今後要求されるコンテンツ対応の通信品質に関する調査と整理
- ② ネットワークのEnd-to-Endの通信品質制御技術に関する調査と整理
- ③ 実験設備の調達ならびにネットワーク構築

(2. 1. 2) 通信品質制御方式の研究・開発

平成13年度は通信品質制御方式の下記項目について検討を実施する。

- ① 階層フローの定義および検出手段の検討

フローの検出に用いる情報として、送信/受信回線、イーサヘッダ情報、IPヘッダ情報、TCP/UDPヘッダ情報などが考えられる。

ここでは、サービス利用者の観点より要求条件を明確にし、フローの定義および階層化方式の検討を行う。

- ② 階層フロー通信品質制御機能の実装方式案
アクセスゲートウェイのプロトタイプ実装方式を検討する。

(2. 2) イー2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

(2. 2. 1) 次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件の整理

平成13年度は以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行う。

- ① IPルータにおける通信品質制御技術の調査と整理
- ② イーサスイッチにおける通信品質制御技術の調査と整理
- ③ 実験設備の調達ならびにネットワーク構築

(2. 2. 2) イーサネットにおける通信品質制御・管理方式の検討

① イーサスイッチ制御方式

管理装置からイーサネットワークを管理するために必要な、イーサスイッチのリモート制御について、既存イーサスイッチの通信制御技術の調査結果を受けて、適切な制御方式および使用方式について検討する。

② イーサネットワーク管理装置の実装方式

イーサネットワーク管理装置のプロトタイプ実装方式を検討する。

(2. 3) イー3 IPネットワークとイーサネットワークの連係連携技術の研究開発

(2. 3. 1) IPネットワークとイーサネットワークの通信品質制御連携技術

平成13年度は次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため以下の既存技術調査・整理を行う。

- ① IPネットワークとイーサネット、ATMなどのLayer2ネットワークの連携による通信品質制御技術の調査と整理

4-2 研究開発の実施内容

(1) 課題ア 高臨場感ディスプレイ（IPD）用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

平成13年度は、平成14年度に行う中間目標までの研究開発に先立ち、課題項目の詳細化、既存技術調査、主要研究設備の調達等を行った。

各項目の詳細は、以下のとおりである。

(1. 1) ア - 1 超大容量映像データ処理・管理技術

(1. 1. 1) 画像処理並列化技術

画像の幾何変換、色変換、射影変換処理などの画像処理が、ネットワーク接続された複数のPC上で、効率的に分散並列して行われる仕組みの開発のため、下記項目の検討・準備を行った。

① 並列化可能な画像処理項目の列挙

② 同 実装に必要となるアルゴリズム等についての公知技術の調査

③ 同 処理を実装するPC等設備の選定と調達

①では、一般のノンリニア編集システムの機能などを調査し、また弊社が過去に行ったデジタル映像コンテンツ制作における画像処理内容などを分析、整理した上で、各処理についての並列化可能性について検討を行った。

②では、上記検討内容に基づき、その処理を実現するのに必要となる公知技術について、画像処理技術書などを対象に調査を行った。

③では、上記検討内容に基づき、その処理を実装する複数のPC等からなるハードウェアシステムを設計し、計算能力、ネットワーク能力、記憶容量、汎用性、価格等の諸条件を考慮した上で機器を選定し、その調達を行った。

(1. 1. 2) 超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

超大容量映像データを効率的に保存・管理する技術開発に必要となる、ディスクアレイ、テープデバイス、ネットワーク機器等、設備の選定と調達を行った。

データストレージ手段を、

(a) アクセス性能：中、容量：中 の特徴を持つ保存手段 → ディスクアレイ

(b) アクセス性能：小、容量：大 の特徴を持つ保存手段 → D T F デバイス

(c) アクセス性能：大、容量：小 の特徴を持つ保存手段 → ローカルディスク

の3タイプのデバイスに分けて考え、それぞれがネットワークにて接続されるシステムとしての全体設計を行ったのと同時に、各デバイスについて、機能、容量、汎用性、価格等の諸条件を考慮した上で機器を選定し、その調達を行った。

(1. 2) ア - 2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

(1. 2. 1) 複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術

複数のビデオカメラで撮影された映像の射影変換処理によって1枚の超高精細・広視野角の映像を取得する技術の開発のため、下記項目の調査・準備を行った。

① 複数のビデオカメラを用いた映像撮影に関する公知技術の調査

② ビデオカメラ等の実験設備の選定と調達

①については、現在世界的に注目されている Omni-directional Camera (全方位カメラ) に関する論文などを中心に調査を行った。

また、②については、撮影映像のクオリティ、インターレス・プログレッシブの種別、パン・チルトなどの付加機能などを検討の上で機器を選定し、その調達を行った。

(1. 2. 2) 移動カメラを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、射影変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続する技術の開発に必要となる、カメラ、ロボット等、実験・開発設備の選定と調達を行った。

カメラについては、上記（1）のカメラを兼用することとし、ロボットについては、カメラを回転させるためのものとして、6自由度固定型ハンドロボット、および移動可能な軽量のものとして4自由度固定型ハンドロボット、またカメラを移動させるものとして、前記ハンドロボットを取り付け可能な大型モーションロボット、および室内用小型3輪モーションロボット、ならびに凹凸のある床面を移動可能な小型4輪モーションロボットを選定し、その調達を行った。

(1. 3) ア - 3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

(1. 3. 1) 映像編集情報管理方式の研究

映像制作・編集過程におけるIPD固有の処理技術の開発のため、下記項目の検討・調査を行った。

① スクリーン形状やプロジェクタ構成の違いに対応する IPD 固有の映像編集処理と、それらに関する諸課題の列挙

② 課題解決に必要となる既存技術の調査

①については、弊社開発済み IPD 映像表示環境を対象とし、その映像制作・編集過程において特に必要となる具体的処理内容について検討し、その要求機能仕様、課題等の洗い出しを行った。

また、②については文献・論文を対象として、既存技術の調査を行った。

(1. 3. 2) カメラワーク管理方式の研究

撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）の扱い方法に関する既存技術の調査を行った。

特に、コンピュータビジョン（3次元画像認識技術）をビジュアライゼーション（映像制作・表示処理）に応用する技術に関する論文などを対象とした。

(1. 3. 3) 実験コンテンツの制作

本年度、本項目に関する研究開発は、当初の予定どおり実施しなかった。

(1. 4) ア - 4 リアルタイム映像制作技術

(1. 4. 1) 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術

上記課題ア - 2 で挙げた開発技術の、リアルタイム化を試みるための、実験設備の選定と調達を行った。

カメラについては性能、価格等を考慮し、画像処理ボードについてはカメラとの親和性や処理速度を考慮し、また PC については価格を考慮し、その他 下記デモンストレーションを実施する際に必要となる機能等を考慮した上で機器を選定し、その調達を行った。

(1. 4. 2) マルチカメラによる遠隔監視システム プロトタイプの開発

アプリケーション技術の検討およびその検証を目的とした実験アプリケーションを開発するため、下記項目の検討・準備を行った。

- ① アプリケーションデモシステムの全体構想策定
- ② 主要設備の選定と調達

①については、主に機器選定のためのハードウェア構成策定を目的とし、検討を行った。複数のカメラから撮影された映像を複数の PC に取り込み、これをデジタルデータとしてギガビットネットワークで別の複数の PC に送信する。データを受け取った PC は、それぞれ、 IPD 映像表示環境の構成に従った適切な映像変換を行う画像ボードを介して、プロジェクタに映像を出力する。以上のような機能・構成を、アプリケーションデモシステムとして、現時点（研究開始時点）では想定するものとする。なおこれらの仕様は、上記課題ア-1～3 の研究の結果によって適宜変更されるものとする。

②については、上記デモシステムの仕様・構成を考慮した上で機器の選定を行い、その調達を行った。特に、既存の IPD 映像表示環境（プロジェクタアレイシステム）との接続性について留意した。

(2) 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

平成 13 年度は、平成 14 年度からの技術開発、プロトタイプ開発に先立ち、課題項目の基礎検討、既存技術調査、主要研究設備の調達を行った。また、イのテーマ全体の技術開発傾向を把握する目的で、「イーサネット／IP ネットにおける通信品質」に関する特許調査を行った。

また、各項目の詳細は、以下の通りである。

(2. 1) イー1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

(2. 1. 1) 次世代ネットワークサービスの通信品質制御に対する要求条件の研究

本委託業務では、次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため、以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行った。

- ① 今後要求されるコンテンツ対応の通信品質に関する調査と整理
- ② ネットワークのEnd-to-Endの通信品質制御技術に関する調査と整理
- ③ 実験設備の調達ならびにネットワーク構築

①では、ネットワークサービスの通信品質の要件項目を調査整理した後、次世代ネットワークで主流になると予想される、映像配信（伝送）システム、IP電話システム、TV会議システムの仕様及びシステム品質要件について調査した。最後に、上記の調査結果を元に、今後のコンテンツ対応の通信品質要件について検討した。

②では、ネットワークで現状使用されている、または、検討されている品質制御技術について調査整理した。具体的には、エンドホスト上及び中継ノードに実装される品質制御機能について、プロトコル技術、パケット制御技術を中心に調査、整理した。

③では、本研究で開発する通信品質制御機能、及び管理技術を評価、検証するための実験設備の調達及びネットワーク構築を行った。

(2. 1. 2) 通信品質制御方式の研究・開発

通信品質制御方式の下記項目について検討を実施した。

- ① 階層フローの定義および検出手段の検討
- ② 階層フロー通信品質制御機能の実装方式案

①では、フロー検出に用いることができる情報を、レイヤー別に整理し、それらを用いた新しい階層フローの定義方法を検討した。

②では、そのような品質制御機能に基づいた、ユーザー間のフェアな帯域分配とフロー種別に基づいた品質制御方式案を検討した。

(2. 2) イー2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

(2. 2. 1) 次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件の整理

以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行った。

- ① IPルータにおける通信品質制御技術の調査と整理
- ② イーサスイッチにおける通信品質制御技術の調査と整理

③ 実験設備の調達ならびにネットワーク構築

①では、IPルータにおける通信品質制御技術としての、包括的なフレームワークについて調査を行い、整理した。②では、イーサスイッチにおける通信品質制御技術として、IEEEでの活動状況を調査し、整理した。

さらに現在市販されている製品について、実用化されている技術の調査を行った。

①では、IPルータにおける通信品質制御技術の種別を調査し、代表的なメーカーの主要な製品における実装状況を整理した。また、IPルータの主要部品となりつつある、ネットワークプロセッサの製品動向についての調査も行った。②では、イーサスイッチにおける通信品質制御技術の種別を調査し、代表的なメーカーの主要な製品における実装状況を整理した。

③では、本研究で開発する通信品質制御機能、及び管理技術を評価、検証するための実験設備の調達及びネットワーク構築を行った。

(2. 2. 2) イーサネットにおける通信品質制御・管理方式の検討

既存イーサスイッチの通信制御技術の調査結果を受けて、管理装置からイーサネットワークを管理するために必要な、イーサスイッチのリモート制御について、下記項目について検討した。

① イーサスイッチ制御方式

② イーサネットワーク管理装置の実装方式

具体的には前項での調査結果に基づき、管理装置からイーサスイッチ制御を実現する為の方式検討を行った。また、イーサネットワークをリモート制御する管理装置の実装方式を検討した。

(2. 3) イー3 IPネットワークとイーサネットワークの連係技術の研究開発

次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため以下の既存技術の調査・整理を行った。

(2. 3. 1) IPネットワークとイーサネットの連係による通信品質制御技術の調査と整理

IPレベルでの通信品質制御パラメータとイーサネットレベルの通信品質制御パラメータとの間の整合性の取り方について検討した。

5 研究開発実施状況（平成13年度）

5-1 課題ア 高臨場感ディスプレイ(IPD)用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

本年度は平成14年度に行う中間目標までの研究開発に先立ち、課題項目の詳細化、既存技術調査、主要設備の選定等を行った。

本節では以下のテーマ毎にその詳細を報告する。

- ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術
- ア-2 超高精彩・広視野角映像の撮影技術
- ア-3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術
- ア-4 リアルタイム映像制作技術

5-1-1 ア-1 超大容量映像データ処理・管理技術

本研究では、IPDが持つ特徴のなかで、映像作成時の処理量およびデータ量が膨大になるという点に着目し、①処理を分散・並列化させて処理を効率化する、②大容量データ管理方法を効率化する、の2つのアプローチにより、その特徴に対応可能な実用技術を開発する。具体的には、以下の2つのテーマについて研究を行う。

- ① 画像処理 並列化技術
- ② 超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術

5-1-1-1 本年度の研究開発目標

(1) 処理項目の列挙と公知技術の調査

テーマ①に関して並列化可能な画像処理項目を、一般のノンリニア編集システムの機能調査や、弊社が過去に行ったデジタル映像制作時の処理内容などの分析により列挙し、その実装に必要となる公知技術について調査を行う。

(2) 設備の選定と調達

テーマ①、②の研究開発を実施するのに必要となるPCやデータストレージ設備などの選

定と調達を行う。

5 - 1 - 1 - 2 実施内容

(1) 映像制作過程における画像処理並列化に関する研究

(1. 1) はじめに

超大型スクリーンやマルチ（多面）スクリーン、柱面スクリーンやドーム型球面スクリーンといった特殊表示環境に対して、高精細・広視野角の映像を投影し、よりリアルで豊かな臨場感を持った映像空間を提供しようとする高臨場感ディスプレイ（IPD：Immersive Projection Display）が注目されている。しかし、投影する映像が高精細・広視野角であるため、扱う映像素材も高解像度・大容量なものとなり、コンテンツ制作には膨大な時間を費やす。本稿では、高解像度・大容量のコンテンツを効率的に作成するためにノンリニア編集システムに必要となる機能について検討を行う。

(1. 2) ノンリニア編集とは

時系列の画像データに対してイン点、アウト点を定義し、別の時系列画像データを挿入したり、その部分を削除したりすることで、カットの修正やカット順の入れ替え、カットの消去・追加等の編集を行う処理をノンリニア編集という。

従来これらの作業は、素材の頭出しが必要なリニアな媒体であるテープを用いたVTRシステムで行っていた。これがランダムアクセス可能なハードディスク等のデジタル媒体に置き換わったことから、リニアに対比させてノンリニアと呼ばれる。

画像データの表現方法としては、ラスタ型データ表現とベクトル型データ表現とがある。ラスタ型データ表現とは、画像を画素の2次元配列として表現しているもので、ベクトル型データ表現とは、画像を構成する点や線、面、文字などの構成要素を表すものである。ノンリニア編集で扱うデータは、ラスタ型のデータで表現されたものである。

現在、映画制作やビデオ編集の現場で使用されている主なノンリニア編集システムとしては、Eastman Kodak社のCineon、株式会社バイトラックスのRayz [Bytelux]、日本デジタル・プロセッシング・システム株式会社のDigital Fusion [Dpsj]、オートデスク株式会社ディスクリートディビジョンのCombustion [Discreet]などが知られている。

(1. 3) IPD 影像表示環境および従来のコンテンツ制作環境

我々はIPDに表示するためのコンテンツ制作に、図1に示すような構成のノンリニア編集システムを使用している。このシステムで行われる編集作業は以下の3つの工程に分けて考えることができる。

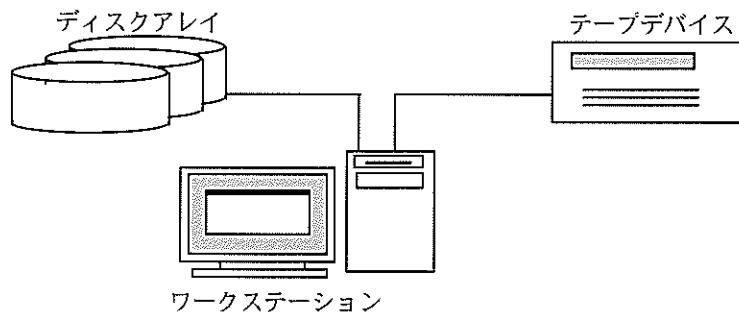


図 1 従来の IPD 用ディジタル映像コンテンツ編集環境

[1] 映像編集工程

複数の映像素材データに対して色変換処理、幾何変換処理、合成処理などを加え IPD のスクリーン全体に表示したい映像を作成する工程である。編集には、映画制作などで使用されてきたノンリニア編集システムである Cineon の既存機能を用いて行われる。

編集内容、扱う映像素材データ量、出力映像の解像度などの諸条件により異なるため一概には言えないが、一般に映像編集工程は扱う画像データの解像度が大きいため、3つの工程のうちで最も処理時間がかかる。

[2] 映像分割工程

映像編集工程で作成した画像にスクリーン形状に合わせた画像分割処理または射影変換処理を施し、各プロジェクトから投影される画像を作成する工程である。本工程も Cineon を用いて行うが、IPD のスクリーン形状に対応する射影変換処理などは既存機能として用意されていないため、プラグインによる機能追加を行い使用している。

本工程では、映像編集工程で作成された画像 1 フレームから IPD を構成するプロジェクト台数分の画像が作成される。

[3] 動画作成工程

映像分割工程において作成されたプロジェクト台数分の投影画像を avi ファイルや mpeg ファイルなどの動画圧縮形式に変換する工程である。動画作成はフレーム順に従って行われる処理である。このため、映像の途中で作成されていないフレームが存在すると、それ以後全てのフレームが作成されている場合でも処理が待たされることになる。

本工程は、ネットワーク上にある複数の PC に市販のアプリケーションをインストールし、これを用いて動画作成を行っている。

以上の流れを図に示すと図 2 のようになる。

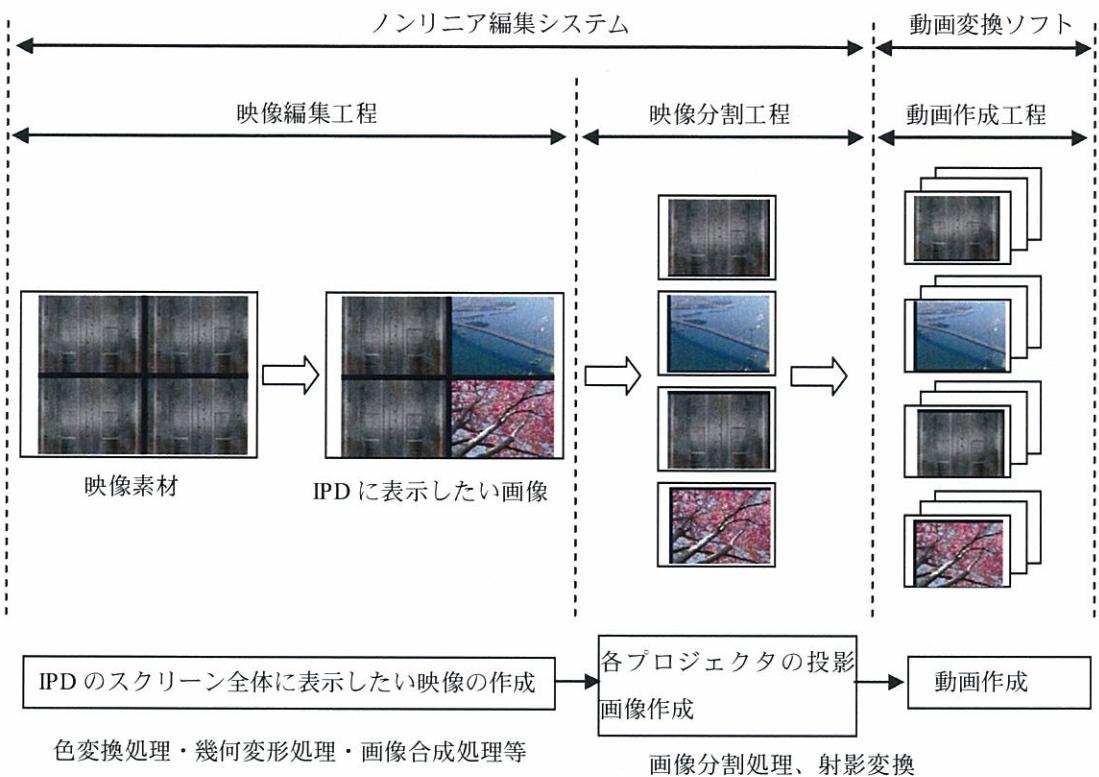


図 2 従来の IPD 用コンテンツ制作の流れ

(1. 4) Cineon を用いた編集作業の概要と問題点

以下、Cineon を用いた編集作業の概要を示すと共に IPD 用コンテンツ制作における問題点について述べる。

Cineon を用いた編集作業は、大きく以下の 2 つに分けて考えられる。

- ① 編集工程
- ② レンダリング工程

(1. 4. 1) 編集工程

Cineon では基本的な画像処理がノードと呼ばれる入力および出力ポートを持った四角形のオブジェクトで表現され、Flowgraph と呼ばれる編集ウィンドウ上で、ノードを線でつなぐことで、入力画像から出力画像までの処理の流れ（画像処理フロー）を作成する。なお、編集された内容はジョブと呼ばれるファイルに保存され、次のレンダリング工程において、これを実行することにより、編集された内容の画像処理が実行され、出力画像の作成が行われる。この工程での基本的な作業の流れは以下の通りである。

[1] 入力画像の準備

通常入力画像はテープデバイスなどに保管されているため、出力映像作成に必要な入力画像をテープデバイスなどからノンリニア編集システム上のハードディスクに読み込む準備作業が必要となる。

[2] 画像処理フローの作成

入力画像から出力画像を作成するために、必要な画像処理の選択と実行順序を決定する。ノードの出力ポートと他のノードの入力ポートを線で結ぶことにより画像処理の実行順序が決定される。ノードの外観を図 3 に、編集中の画像処理フローの様子を図 4 に示す。

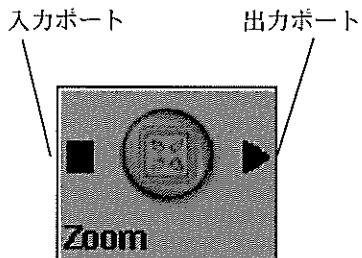


図 3 ノードの例

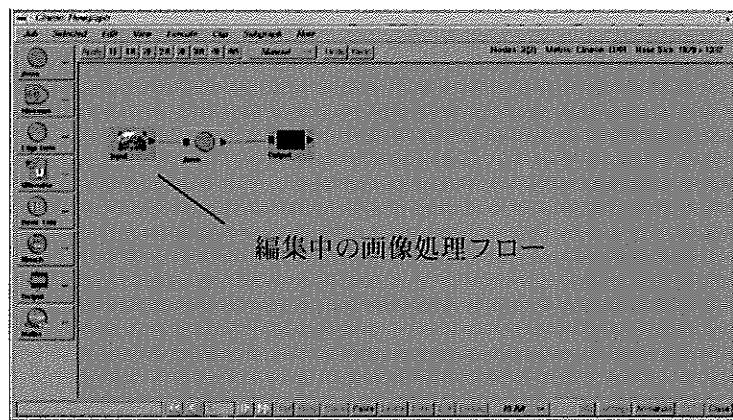


図 4 Flowgraph と編集中の画像処理フロー

[3] 画像処理効果の調節

一般に画像処理には、その処理の影響を調節するパラメータが用意されることが多い。画像処理を視覚的に表現したノードにも、このようなパラメータが用意されている。このパラメータを調節することにより、その画像処理の出力映像への影響を変化させることができる。通常図 5 のような GUI によりパラメータの調節を行う。

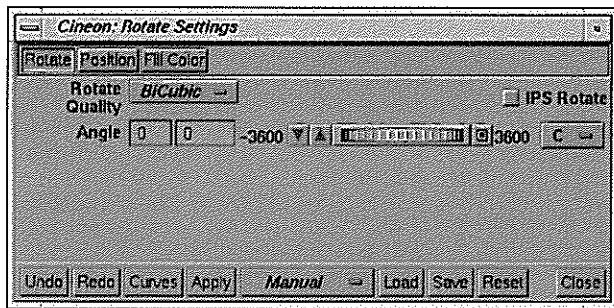


図 5 パラメータ設定ウィンドウ

ノードが持つパラメータは、フレームの進行と共に変化させることができ、その場合には通常、フレームの進行によるパラメータ変化をグラフ形式で表現した図 6 のウィンドウを用いて編集を行う。

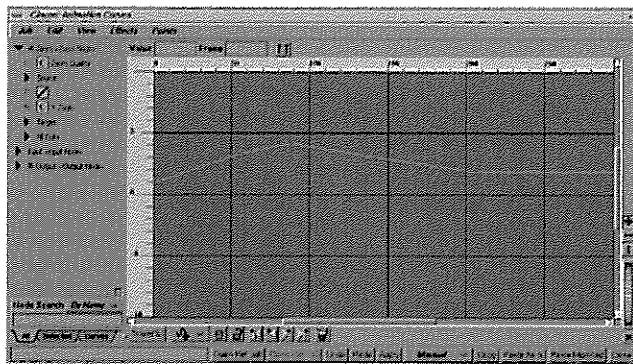


図 6 パラメータ設定（アニメーション）

なお、ジョブ作成において使用可能な画像処理の主なものを表 1 に示す。

表 1 Flowgraph 内で使用できる画像処理

画像処理名称		処理概要
幾何変換	Resize	入力画像のサイズ変更を行う。サイズが変更されるとともに拡大・縮小が行われる。
	Zoom	入力画像の拡大・縮小を行う。Resize と異なる点は、画像サイズが変更されないことである。
	Rotate	入力画像の回転を行う。
	Vertical Flip	入力画像の上下反転を行う。
	Horizontal Flip	入力画像の左右反転を行う。
色調整	Basic Color	入力画像のレベル調整、コントラスト調整、輝度・色相・彩度の調整を行う。

フィルタ	Sharpen	入力画像の鮮銳化を行う。
	Edge Detect	入力画像のエッジ検出を行う。
	Blur	入力画像をぼかす。
	Motion Blur	物体が高速に移動した時にその物体がぶれたように見える効果を付ける。
合成処理	Paste	A、B 2つの入力画像を受け取り、入力画像 A の上に入力画像 B の貼付けを行う。
	Composite	A、B 2つの入力画像とマット入力画像を受け取り、マット入力画像に基づき、A、B 2つの入力画像を合成する。
	Ultimatte	画像の中からある特定色を持つ領域を抜き出し、そこに他の画像を埋め込むことにより画像の合成を行う処理である。
	Dissolve	A、B 2つの入力画像を受け取り、入力画像 A から入力画像 B へのフェードやその逆の効果をつける。
その他	Motion Tracking	入力画像中に存在する特徴的な部分画像のフレーム間対応をテンプレートマッチングにより求める。

編集工程において作業者は、ジョブへの新たなノードの追加や、ノードのパラメータ調節など、そのジョブの出力画像に変化を伴う操作を行うたびに、その操作が正しいものかどうかを確認するためのレンダリング処理を実行することになる。一般に画像処理フローの作成は、試行錯誤的な作業となるため、このような確認用のレンダリングが繰り返し行われる。

しかし、処理する画像解像度が増加するにつれ、この確認用レンダリングにかかる処理時間も飛躍的に大きくなる。IPD のコンテンツ制作では、高解像度の画像を編集するため、このような試行錯誤的な処理に費やす処理時間が、作業効率を考える上で無視できないものになる。

(1.4.2) レンダリング工程

この工程では、編集工程で作成したジョブを実行して出力画像の作成を行う。ジョブを実行すると、出力画像を作成するために必要な入力画像がメモリ上に読み込まれ、この入力画像に対して Flowgraph で編集した複数の画像処理が順番に実行されて、出力画像が作成される。レンダリング開始時に設定されたレンダリング開始フレームから終了フレームまで、上記動作が自動的に繰り返され出力画像の作成が行われる。この工程ではレンダリング時

間に関する問題のほかにディスク容量に関する問題が生じる。

一般にノンリニア編集システムでは大容量のハードディスクを備えることが多いが、高解像度画像のレンダリングにおいては、画像1枚のデータ容量が大きいためにレンダリング途中でのハードディスク容量不足など、記憶デバイスの容量不足に起因する問題が多く発生する。

例えば、横4000ピクセル、縦3000ピクセルの入力画像に何らかの処理を加え、解像度を変更せずに出力する場合を考えると、1枚の出力画像ファイル容量は、約36MByte（非圧縮、1ピクセルを3Byteで表現）となる。このサイズの画像を用いて3分間のコンテンツを制作しようとした場合、コンテンツのフレームレートを30FPSと仮定すると出力画像だけでも約194GByte(36(MByte)×30(FPS)×60(Sec)×3(Min))となる。

通常、合成やフェードアウトなど、1フレームの出力画像作成に複数の入力画像が必要なことを考えると、3分程度のコンテンツ作成に1TByte以上の容量を持ったハードディスクを必要とする場合も少なくない。

そのため、最小限必要な入力画像のみをハードディスク上に置き、必要の無いものはテープデバイスに一時的に保存するなどして、限られたハードディスク容量を有効に活用する工夫が人手で行われてきた。しかし、多数の出力画像を作成するレンダリング工程では多くの実行時間を要し、夜間に計算機を無人で運転させる場合も多い。そのため、入力画像と作成される出力画像のデータ容量の見積を誤ると、出力画像の作成が途中で中断され、時間が浪費されてしまうことがしばしば起きてしまう。通常、映像編集作業は、実写、CGなどの素材データが全てそろった段階で行われるため、制作作業の最終段階で行われる。そのため、このような時間の浪費が許されない状況が多い。

また、Cineonにはこのような無人作業のために複数のジョブを順番に自動実行する機能があるものの、この機能により制御されるジョブおよびそのジョブで編集される入力画像は全てハードディスク上に置かなければならず、ジョブ内にテープデバイスの制御（データ読み込みや書き込み）を行うコマンドを記述する手段もないため、ハードディスクの容量の問題から長期の無人運転を行うことは困難であった。さらに、入力画像が複数のテープに保存されている場合には、テープデバイスを制御するコマンドをジョブ内に記述できたとしても、テープの入れ換え作業が自動的に行えないため、このような問題を解決することはできない。

上記のように、高解像度・大容量の画像データを扱うIPDのコンテンツ制作では、レンダリング処理の高速化とハードディスク資源の効率的な運用を自動で行い、よりスムーズな編集作業が行えるシステムの開発が必要である。

（1.5）開発するシステムの構成

上記問題点の解決に分散レンダリングとテープライブラリの活用を考え、図7に示すシステム構成とした。図1における従来システムとの違いは、ノンリニア編集システムで制

御可能な複数のレンダリング PC がネットワークを介して複数接続されていることと、テープデバイスの変わりにテープアレイを使用する点である。なお、システム内の各装置の詳細については（2）において述べる。

分散レンダリングとは、ネットワーク上にある複数の計算機にレンダリング処理を並行に行わせて高速化を図るものである。最近では、一般のノンリニア編集システムでも、分散レンダリングを可能とした製品が見られる。また、プラネタリウムなどの大規模なドーム空間の全周をドーム球殻上に配置した複数台のプロジェクタからの投影によりカバーするバーチャリウムにおいて、映像の歪み補正演算をクラスタの各計算機に分散させ、リアルタイムの投影を行う研究なども行われている [谷 2001]。

このようにネットワーク上にある複数の計算機に処理を分散させる方式はクラスタと呼ばれている。クラスタでは、ネットワーク上に接続される 1 つ 1 つの計算機のことをノードと呼ぶが、近年、ノードに PC を採用した PC クラスタが注目されている。PC クラスタによる分散レンダリングの形態についての検討は（1.6）において行う。

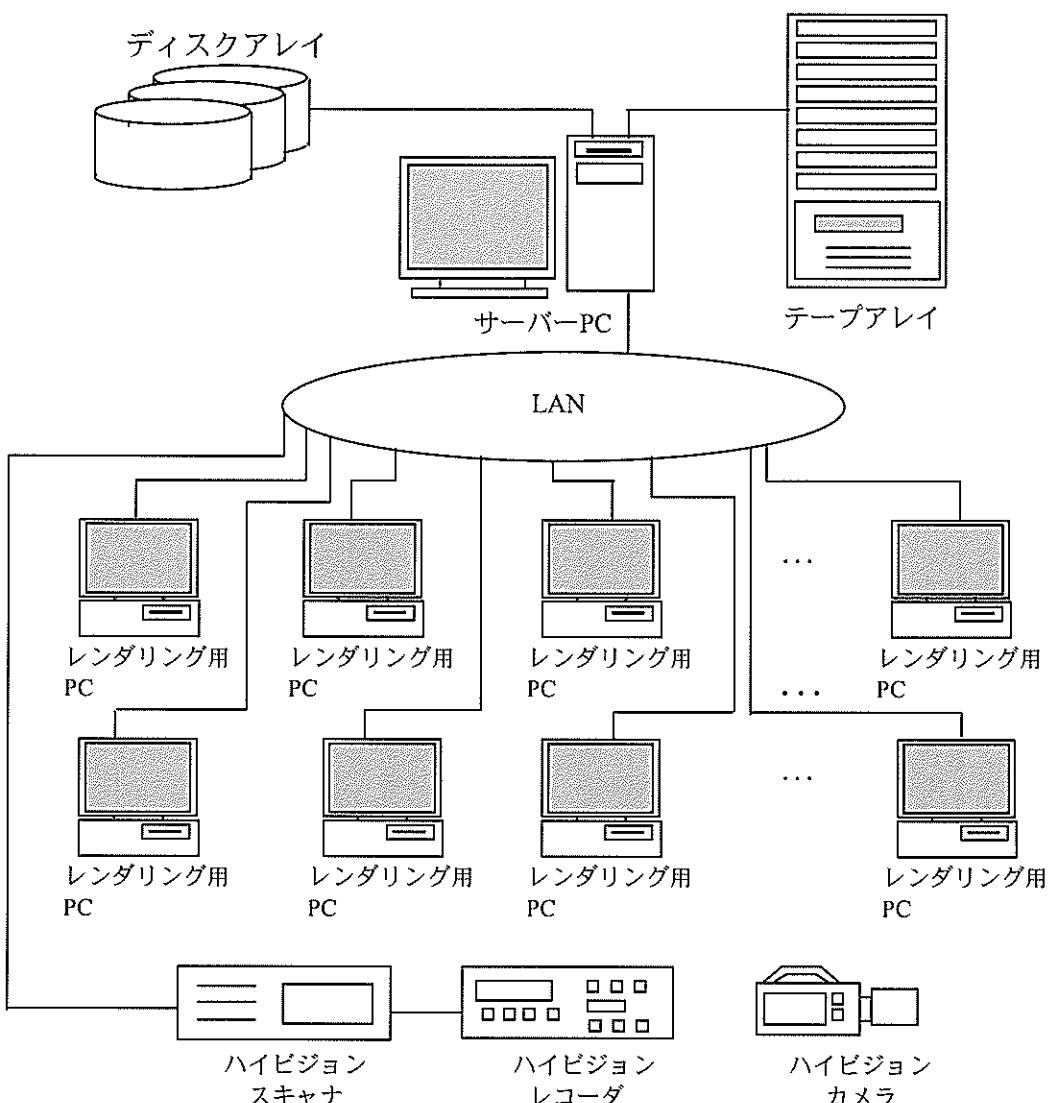


図 7 開発するシステムの構成

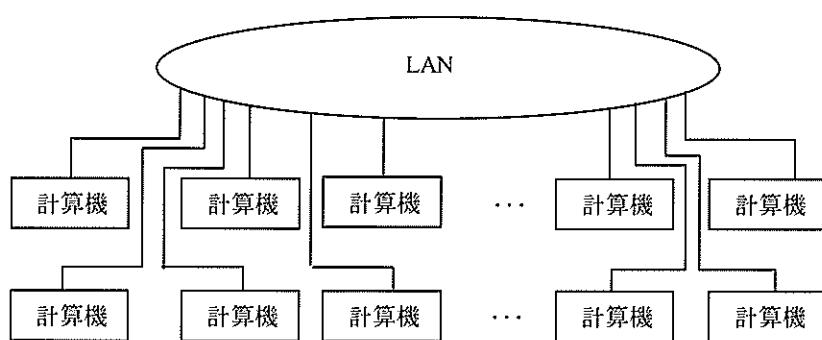


図 8 クラスタ

ノードに PC を採用することによる利点として、新規ハードウェアの開発が不要であること、量産されていることにより低価格であること、アーキテクチャが標準化されているためハードウェアを選択する際の幅が広いこと、さらには、比較的簡単に CPU などを交換することが可能なため、システムが短期間で陳腐化してしまうことを防げるなどの利点が挙げられる [手塚 2001]。

また、テープライブラリとは、ファイルサーバーや Web サーバーなどのデータバックアップ用に用いられる装置で、複数のテープを格納し、テープデバイスへのテープの出し入れを自動的に行える機構を持つ装置である。

テープライブラリを用いることにより、これまで人手を介して工夫していたハードディスクに関わる作業を自動化する予定である。現在考えている主なものを以下に示す。

- ① レンダリングの実行中にハードディスクの容量不足を検出した場合、レンダリング処理を中断し、それまで作成した出力画像をテープに保存すると共に、正常に出力画像の作成が行われ不要となった入力画像の削除を行うなど、今後の処理に不要なデータをハードディスク上から削除した後、レンダリング処理を続行する。
- ② テープ上にあるジョブを自動的に実行することを可能とする。テープ上にあるジョブが実行されると、必要な入力画像をテープからハードディスク上に読み込みレンダリング処理を実行する。
- ③ 映像データが 1 つのテープに書き込めない場合、テープの入れ替えを自動的に行い書き込み処理を続行する。
- ④ 複数ジョブのレンダリングを自動的に行う場合、現在処理中のレンダリングの状況を監視しながら、不要となった入力画像をハードディスク上から削除し、次のジョブの実行に必要な入力画像をテープからハードディスク上に読み込むなどの準備作業を行う。

(1. 6) 分散レンダリング方式の検討

ここでは、表 1 に示した画像処理のうち代表的なものに対して内容を調査し、ノンリニア編集システムの分散レンダリング方式について検討を行う。分散処理を実現するハードウェア構成としては、図 8 に示すクラスタを想定して検討を行う。

(1. 6. 1) 代表的な画像処理

以下、代表的な画像処理の処理内容について文献 [高木 1991] をもとに述べる。

(1. 6. 1. 1) 幾何変換

幾何変換は、以下に示す座標変換および画像の再配列処理により行われる。

a. 座標変換

以下に画像データの主な幾何学的変換について、その座標変換式を示す。この変換式を用いて、変換前と変換後の座標の対応が求められる。なお、変換前の画像座標を (x, y) 、変換後の画像座標を (u, v) で表す。

[1] 拡大・縮小

x 方向に a 倍、 y 方向に b 倍

$$\begin{aligned} u &= ax \\ v &= by \end{aligned} \quad (1)$$

[2] 回転

原点を中心とする角度 θ の回転

$$\begin{aligned} u &= x \cos \theta - y \sin \theta \\ v &= x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned} \quad (2)$$

[3] 反転

x 軸に対する反転

$$\begin{aligned} u &= x \\ v &= -y \end{aligned} \quad (3)$$

y 軸に対する反転

$$\begin{aligned} u &= -x \\ v &= y \end{aligned} \quad (4)$$

b. 画像の再配列

画像の再配列とは、座標変換後の出力画像の格子状配列に対応するように、入力画像の画像データを並べ直す処理である。再配列には図 9 に示す順変換と逆変換の 2 通りがあるが、ラスター画像における幾何変換では、逆変換を用いた再配列が一般的である。

[1] 順変換による再配列法

入力画像のそれぞれの画素について、座標変換後の出力画像座標系上での対応する位置を計算し、その位置に各画素の画像データを投影する方法である。内挿処理は、出力画像座標系上で行い、投影された入力画像の各画素の画像データより、出力画像の各格子点の

画像データを求める。

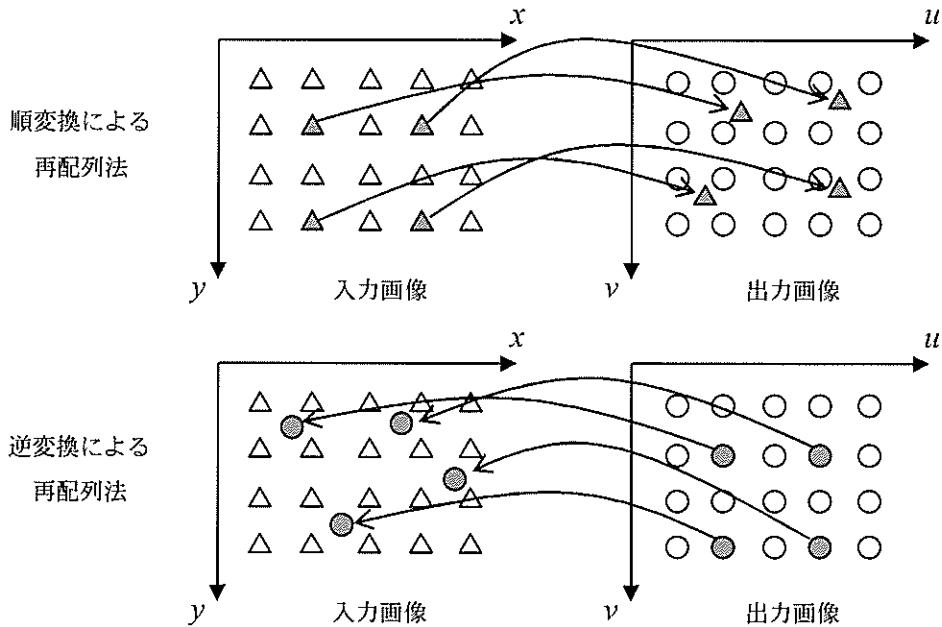


図 9 画像の再配置

[2] 逆変換による再配列法

出力画像のそれぞれの画素について、入力画像座標系での対応する位置を計算し、その位置における画素データを求める方法である。内挿処理は、入力画像座標系上で行い、格子状に配列された入力画像の各画素の画像データより、出力画像の各画素の画像データを求める。

出力画像の各画素に対応する入力画像の画素が存在しない場合もあり、その場合は出力画像を構成するために適当な値を持つデータで穴埋め処理を行う必要がある。

ラスタ画像の幾何変換では、変換後の出力画像座標系上に正方格子を設定し、その格子点に対応する画像データの配列に入力画像を変換する。しかし、計算される対応位置の座標は、一般に整数値とはならない。このため、求めたい点の画像データを、周辺に存在する画像データから内挿によって求める必要がある。ラスタ画像の幾何変換で主に用いられる内挿法には、最近隣内挿、共1次内挿、3次たたみ込み内挿の3つの方法がある。

ここでは、ラスタ画像の幾何変換において一般的に使用される、逆変換の考え方に基づく再配列について述べる。以下の説明では、内挿したい点の入力画像座標を (u, v) 、その画像データを P 、また入力画像で画素番号 i 、ライン番号 j の格子点 (i, j) の画像データを $P_{i,j}$

とする。なお、 $\lceil \cdot \rceil$ はガウス記号で、少數部分を切り捨てて整数部分をとることを示す。

[1] 最近隣内挿(nearest neighbor interpolation)

図 10 に示すように、内挿したい点に最も近い格子点の画像データを求める点の画像データとする。式で表現すると次のようになる。

$$P = P_{i,j} \quad (5)$$

ただし、 $i = \lceil u + 0.5 \rceil$ 、 $j = \lceil v + 0.5 \rceil$

この方法では、最大 0.5 画素の位置誤差が生じるが、入力画像データを壊さない利点がある。また、処理アルゴリズムが簡単であるという利点もある。

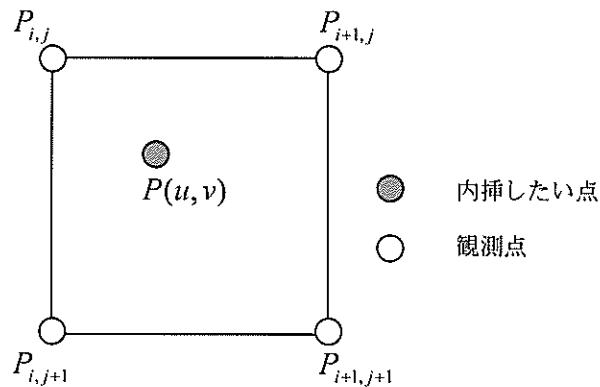


図 10 最近隣内挿

[2] 共 1 次内挿(bi-linear interpolation)

内挿したい点の画像データを、その点の周囲 4 点の画像データを用いて、次式で求める。

$$\begin{aligned} P &= ((j+1)-v, v-j) \begin{pmatrix} P_{i,j} & P_{i+1,j} \\ P_{i,j+1} & P_{i+1,j+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (i+1)-u \\ u-i \end{pmatrix} \\ &= \{(i+1)-u\}\{(j+1)-v\}P_{i,j} + \{(i+1)-u\}\{v-j\}P_{i,j+1} \\ &= \{u-i\}\{(j+1)-v\}P_{i+1,j} + \{u-i\}\{v-j\}P_{i+1,j+1} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 $i = \lceil u \rceil$ 、 $j = \lceil v \rceil$ である。この方法では、入力画像のデータが壊されるが、平滑化の効果が得られるという利点がある。

[3] 3 次たたみ込み内挿(cubic convolution interpolation)

図 11 に示すように、内挿したい点の画像データを、その点の周囲 16 点の画像データを

用いて、次式を用いて求める。

$$P = (f(y_1), f(y_2), f(y_3), f(y_4)) \begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{2,1} & P_{3,1} & P_{4,1} \\ P_{1,2} & P_{2,2} & P_{3,2} & P_{4,2} \\ P_{1,3} & P_{2,3} & P_{3,3} & P_{4,3} \\ P_{1,4} & P_{2,4} & P_{3,4} & P_{4,4} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \\ f(x_4) \end{pmatrix} \quad (7)$$

ただし、

$$f(t) = \frac{\sin \pi t}{\pi} \approx \begin{cases} 1 - 2|t|^2 + |t|^3 & (0 \leq |t| < 1) \\ 4 - 8|t| + 5|t|^2 - |t|^3 & (1 \leq |t| < 2) \\ 0 & (2 \leq |t|) \end{cases}$$

で、 $x_1 = 1 + (u - \lceil u \rceil)$, $y_1 = 1 + (v - \lceil v \rceil)$, $x_2 = (u - \lceil u \rceil)$, $y_2 = (v - \lceil v \rceil)$, $x_3 = 1 - (u - \lceil u \rceil)$, $y_3 = 1 - (v - \lceil v \rceil)$, $x_4 = 2 - (u - \lceil u \rceil)$, $y_4 = 2 - (v - \lceil v \rceil)$ である。

この方法では、入力画像データが壊されるが、画像の平滑化と同時に鮮鋭化の効果が得られる。

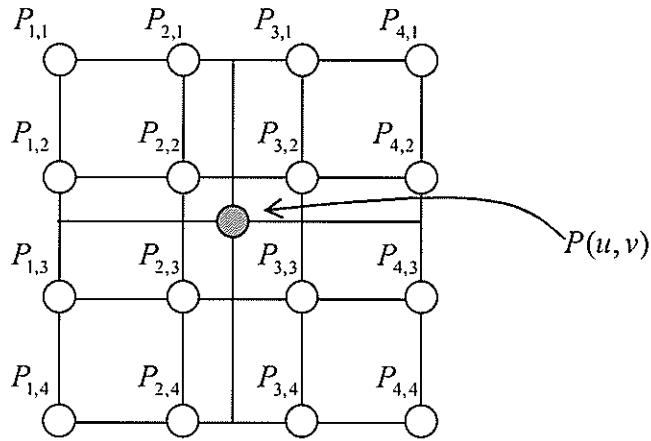


図 11 たたみ込み内挿

(1. 6. 1. 2) 色補正

画像のコントラストを改善し、画像を見やすくするために行う処理である。主なコント

ラスト変換の方法には、コントラスト変換関数を用いる方法とヒストグラム変換による方法の2つがある。

[1] コントラスト変換関数を用いる方法

画像の濃淡を目的に応じた適切な関数で変換する方法である。原画像の濃淡レベルをある関数 f を用いて、変換する。比較的よく用いられているコントラスト変換関数には、図12に示すような関数がある。

コントラスト変換関数のグラフの傾きが1（傾きが 45° ）の場合、コントラストは変わらない。しかし、関数グラフの傾きが1より大きいほど、その部分に対応する濃淡レベルのレベル差がより大きくなるように変換されるため、コントラストは高くなる。逆に傾きが1より小さいとコントラストは低くなる。

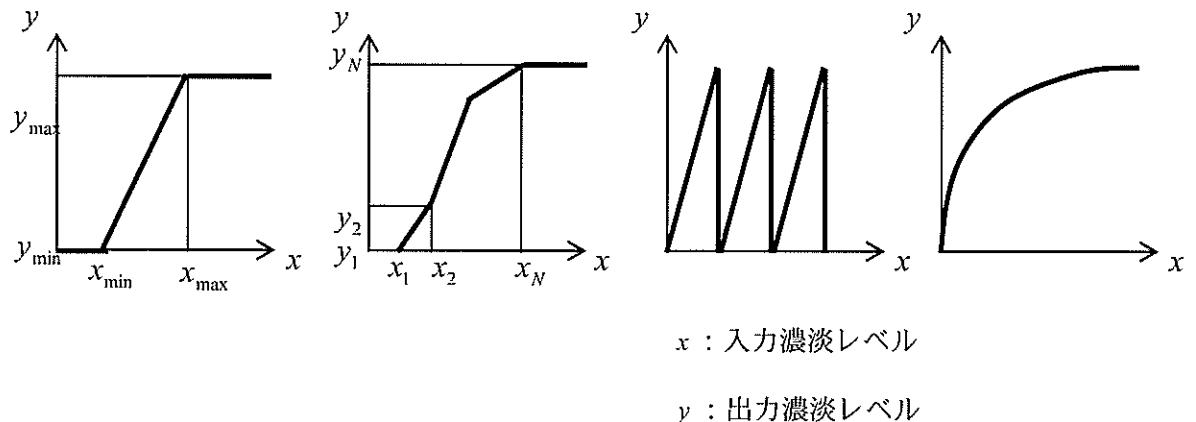


図12 コントラスト変換関数

[2] ヒストグラム変換による画像のコントラスト変換

各濃淡レベルの画素の数を数え上げたものを、濃淡レベルのヒストグラムといい、横軸に濃淡レベル、縦軸にその濃度の画素の数をとったグラフで表される。ヒストグラム変換によるコントラストの変換は、この濃淡レベルのヒストグラムを変更することによって、画像のコントラストを変換する方法である。例えば、次の図13(a)のような濃淡レベルのヒストグラムを示す画像を、(b)や(c)のような濃淡レベルのヒストグラムを示す画像に変換することによって、画像のコントラストを変更する。(b)の場合においては、一様分布のヒストグラムに変換されるため、ヒストグラム平坦化処理と呼ばれる。

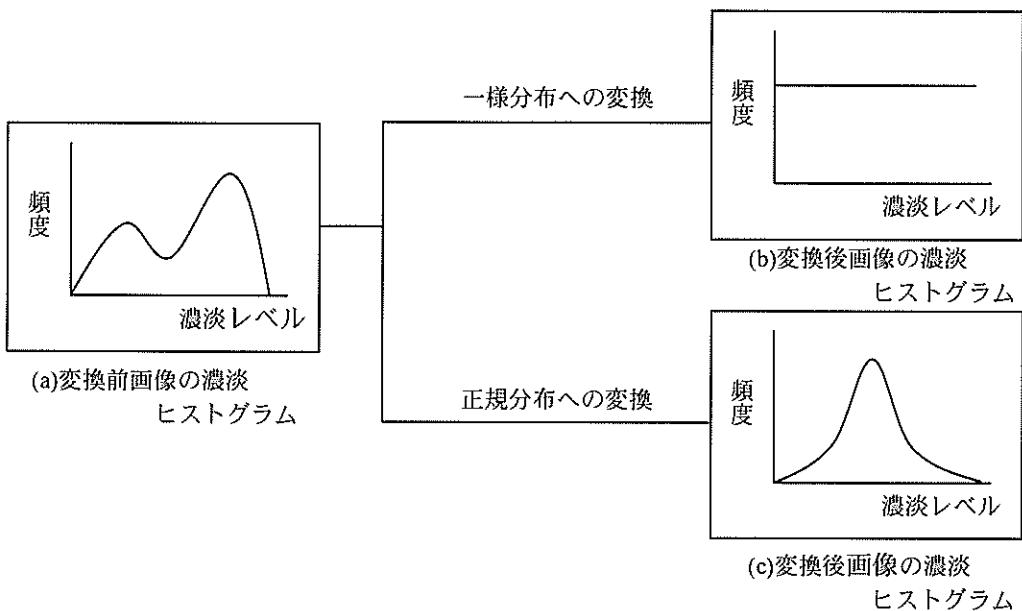


図 13 ヒストグラム変換

ヒストグラム平坦化処理では、変換前画像の濃度ヒストグラムで濃淡レベルの低いほうから順に頻度を加算していく、変換後画像の目標頻度に最も近づく変換前濃淡レベルの範囲に、変換後画像の濃淡レベルを低いほうから割り当てていく。すなわち、下図において、変換前画像の濃度ヒストグラムの濃度値域 $[x_1, x_p]$ で頻度を加算した結果が、変換後画像の目標頻度に最も近づいたとすると、この濃度値域 $[x_1, x_p]$ の濃淡レベルを持つ変換前画像データに濃度値 y_1 を与える。次に、変換前画像の濃度ヒストグラムにおいて、濃度値域 $[x_{p+1}, x_Q]$ で頻度を加算した結果が、目標頻度に最も近づいたら、この濃度値域 $[x_{p+1}, x_Q]$ に濃度値 y_2 を与える。以下、同様にして、濃度値を変換していくことでヒストグラムの平坦化が達成される。

原画像の画素の濃度値がある特定の値域に集中する場合（例えば通常濃度値の平均値周辺では頻度が高い）ヒストグラム平坦化を行うことによって、画像のコントラストが改善される。一方、頻度が小さい値域のコントラストは失われてしまうという欠点がある。

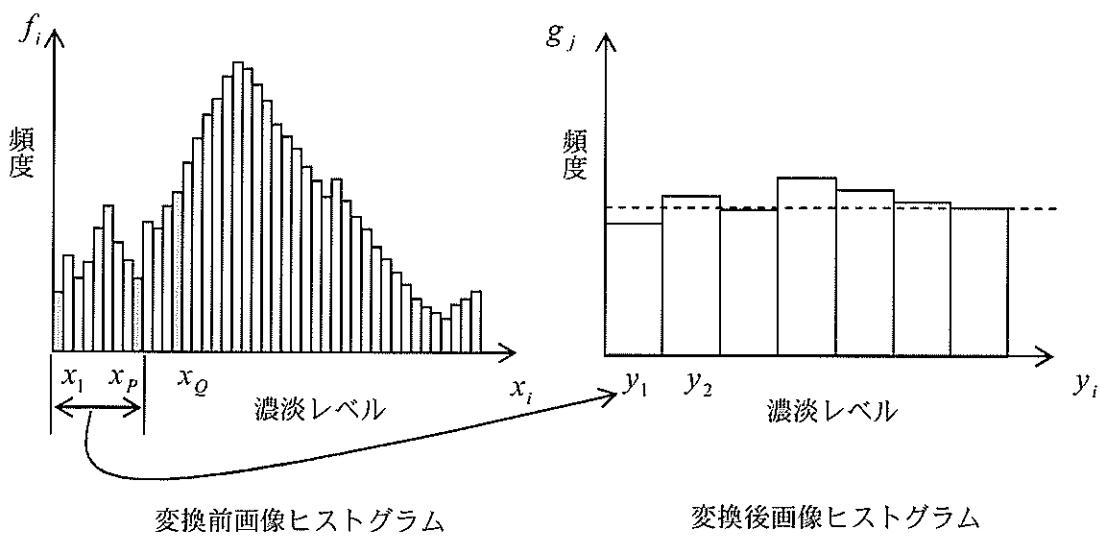


図 14 ヒストグラム平坦化の概念

(1. 6. 1. 3) 鮮鋭化

鮮鋭化とは画像の空間周波数の高周波成分を強調する処理である。具体的な手法は、局所オペレータを使ってラプラシアン（2次微分）を計算する方法とフーリエ変換を用いる方法とに大別できる。現実的には局所オペレータによる手法で十分であることが多いため、ここでは局所オペレータによる方法についてのみ示す。

[1] アンシャープマスキング

原画像からそのラプラシアン画像を減算する方法である。すなわち次式で計算することができる。

$$g(x, y) = f(x, y) - \nabla^2 f(x, y) \quad (8)$$

画質の悪い画像に対して頻繁に使われる画像鮮鋭化手法であるが、雑音成分も同時に強調してしまうという欠点がある。具体的な重み係数としては、図 15 のような 3×3 の演算マスクがよく用いられる

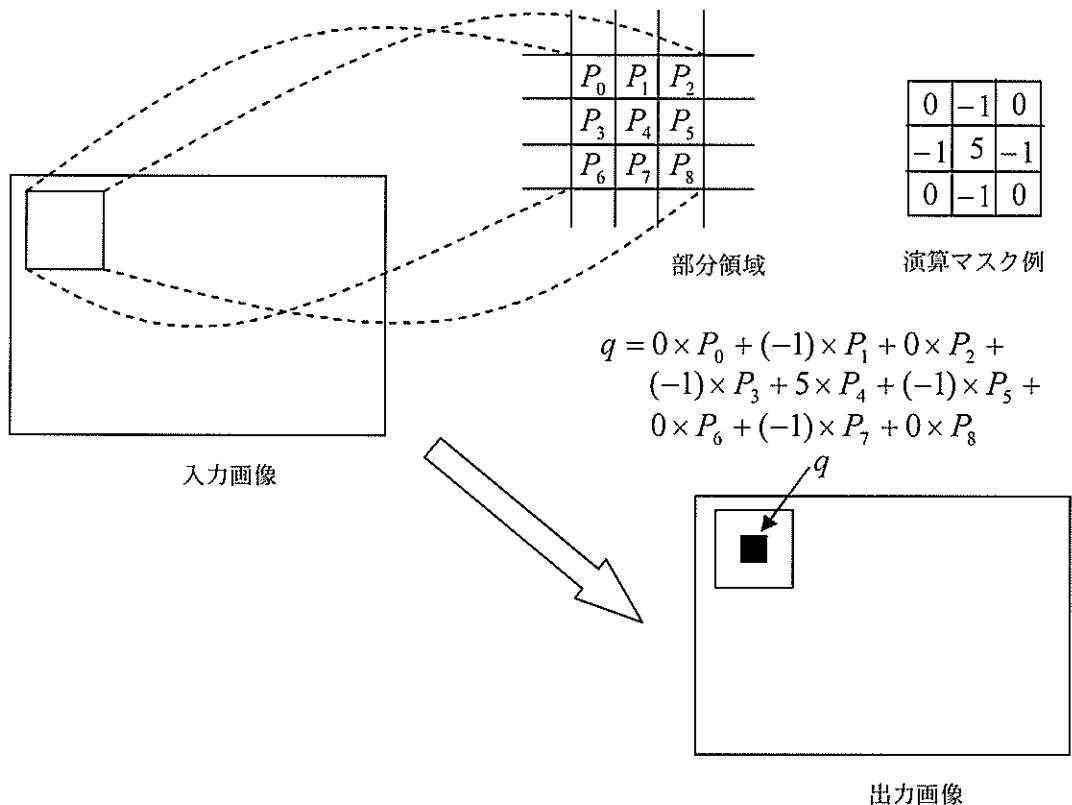


図 15 局所オペレータを用いた鮮銳化

[2] 選択的画像鮮銳化法

[1]の手法に対して、アンシャープマスキングの程度を部分的にコントロールする画像データ (x, y) を付加した方法である。

$$g(x, y) = f(x, y) - h(x, y) \bullet \nabla^2 f(x, y) \quad (9)$$

$h(x, y)$ としては、例えば原画像 $f(x, y)$ に対する線検出画像などが使われる。これにより不要な雑音成分の強調を抑えることが可能である。

(1. 6. 1. 4) モーショントラッキング

モーショントラッキングとは、画面中の特定のマークやパターンを特徴点として、物体やカメラの動きを解析することである。

連続した画像において、最初の画像上で観測された点が次の画像上でどこに移動したか

を調べることを対応点探索問題といい、移動ベクトルが大きい場合は画像の特徴を利用したテンプレートマッチングが利用される。

テンプレートマッチングは、 N フレーム上で与えられた特徴領域（テンプレート画像）が $N+1$ フレーム上のどの位置に移動するかを追跡するものである。

テンプレートマッチングは、テンプレート画像を、それより大きい探索対象画像内で動かし、次式の残差が最小になるようなテンプレート画像の位置を求めて、重ね合わせが達成されたとみなす。ただし、 (a, b) は入力画像内におけるテンプレート画像の左上位置を示し、 $I_{(a,b)}(m_1, n_1)$ は入力画像の部分画像、 $T(m_1, n_1)$ はテンプレート画像である。

$$R(a, b) = \sum_{m_1=0}^{N_1-1} \sum_{n_1=0}^{N_1-1} \{I_{(a,b)}(m_1, n_1) - T(m_1, n_1)\} \quad (10)$$

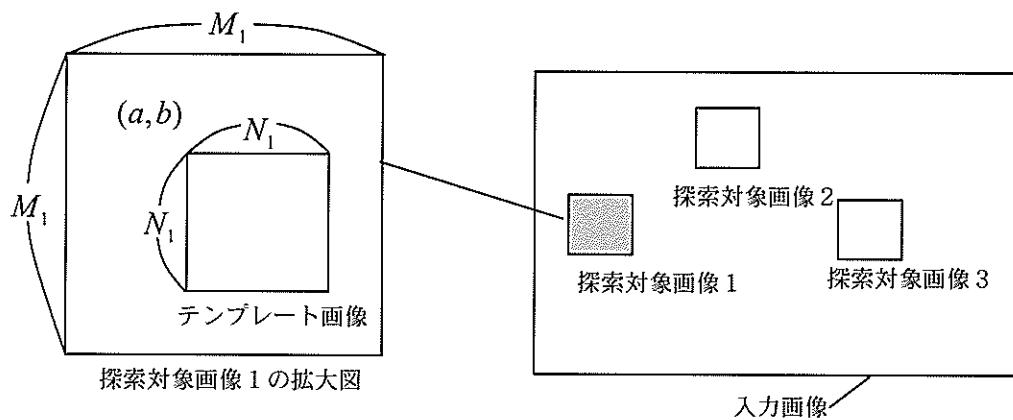


図 16 モーショントラッキング

モーショントラッキングでは、1つの入力画像に対して複数の探索対象画像とテンプレート画像を定義し、複数の特徴領域の動きを検出させることが一般的である。

(1. 6. 2) 代表的な画像処理の分散処理実現方法

ここでは、(1.6.1) で示した基本的な画像処理を単独で実行する場合に、各処理がどのような分散並列処理で実現されるかを考えてみる。

一般に、互いに独立処理可能な大量のデータがある場合に、それらを複数の演算装置に分割して与え、並列処理を行う方式はデータレベル並列処理と呼ばれており、この実現方法についての検討が、[松山 1995]において行われている。

[松山 1995]では、各演算装置において処理の対象となるデータとそのデータに適用する

関数の入出力構造に着目して、5つの基本演算パターンを定義し、各基本演算パターンの並列処理実現方法を示している。[松山 1995]において示された各基本演算パターンと、その並列化実現方法を以下に示す。

[1] 一括型演算

一括型演算は、以下のように表すことのできる演算である。

入力データセット : $D_I = [d_1, \dots, d_n]$

関数 : $F = f$

出力データセット : $D_O = [f(d_1), \dots, f(d_n)]$

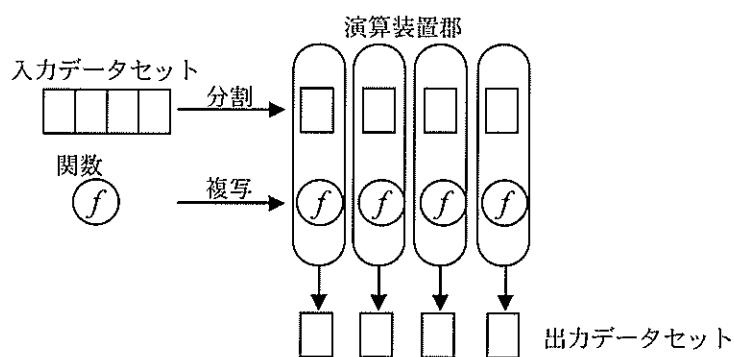


図 17 一括型の分散処理実現方式 ([松山 1995]より抜粋)

一括型演算はデータセットの各要素データが関数の入力となり、入力データセットと同じ構造を持ったデータセットが出力される。

この演算は各演算装置に入力データセットを分割して割り当て、関数を複写することで、SPMD 型 (Single Program Multiple Data) の並列化が可能だとしている。

[2] 分散型演算

分散型演算は、以下のように表すことのできる演算である。

入力データセット : $D_{I1} = [d_1, \dots, d_n]$

$D_{I2} = d$

関数 : $F = f$

出力データセット : $D_O = [f(d_1, d), \dots, f(d_n, d)]$

分散型演算はデータセットと单一要素データが関数の入力となり、入力データセットと同じ構造を持つデータセットが出力される。

この演算は各演算装置に入力データセットを分割して割り当て、入力単一データと関数を複写することにより、SPMD型（Single Program Multiple Data）の並列化が可能だとしている。

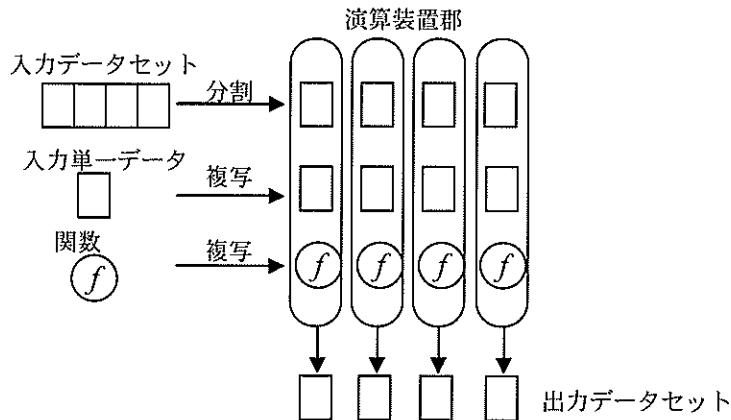


図 18 分散型演算の分散処理実現方式（[松山 1995]より抜粋）

[3] 集約型演算

集約型演算は、以下のように表すことのできる演算である。

$$\text{入力データセット : } D_I = [d_1, \dots, d_n]$$

$$\text{関数 : } F = f$$

$$\text{出力データセット : } D_O = f(f(\dots f(f(d_1, d_2), d_3), \dots), d_n)$$

集約型演算はデータセットの持つ順序構造に従って順次関数を適用することによって、单一データが出力される。

この演算は、各演算装置に入力データセットを分割して割り当て、適切な順序で関数の適用と通信を行うパイプライン型の並列処理化が可能だとしている。

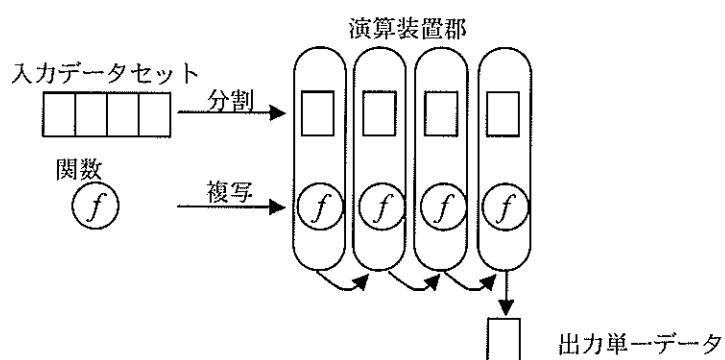


図 19 集約型演算の分散処理実現方式（[松山 1995]より抜粋）

[4] スキャン型演算

スキャン型演算は、以下のように表すことのできる演算である。

$$\text{入力データセット : } D_I = [d_1, \dots, d_n]$$

$$\text{関数 : } F = f$$

$$\begin{aligned} \text{出力データセット : } D_O &= [f(d_1), f(d_1, d_2), \dots, \\ &\quad f(f(\dots f(f(d_1, d_2), d_3), \dots), d_n)] \end{aligned}$$

スキャン型演算は集約型演算と同様の処理を行うが、演算の中間結果を要素とした入力データセットと同じ構造を持つデータセットが出力される。

この演算は集約型演算と同様のパイプライン型の並列処理化が可能だとしている。

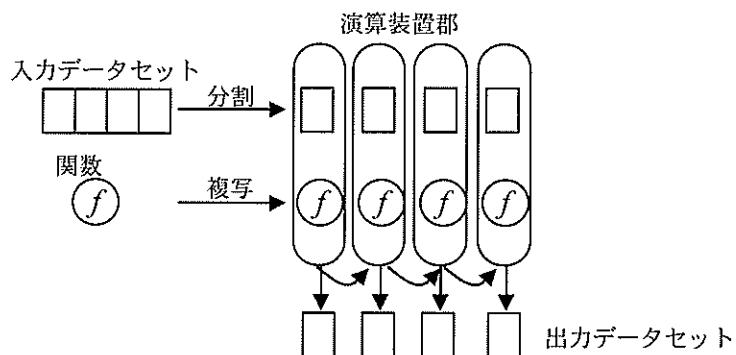


図 20 スキャン型演算の分散処理実現方式 ([松山 1995]より抜粋)

[5] 展開型演算

展開型演算は、以下のように表すことのできる演算である。

$$\text{入力データセット : } D_I = d$$

$$\text{関数 : } F = [f_1, \dots, f_n]$$

$$\text{出力データセット : } D_O = [f_1(d), \dots, f_n(d)]$$

展開型演算は単一要素データに異なる関数を適用し、各関数の演算結果を要素とするデータセットが出力される。

この演算は各演算装置に入力単一データを複写し、関数郡を分散して割り当てることにより MPSD 型 (Multiple Program Single Data) の並列化が可能だとしている。

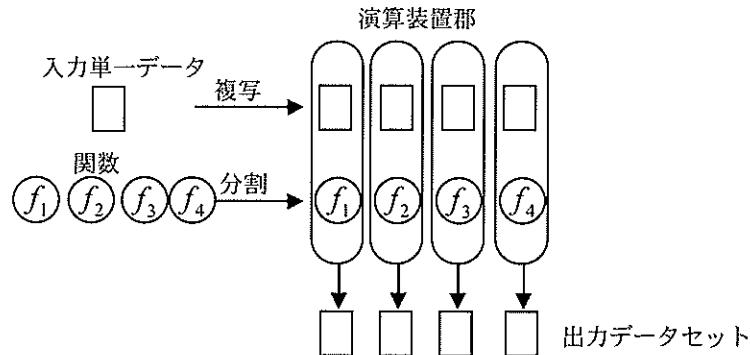


図 21 展開型演算の分散処理実現方式 ([松山 1995]より抜粋)

このように、分散並列処理を行う場合、その処理内容によって実現方法が異なる。一括型演算、分散型演算、展開型演算のように SPMD 型や MPSD 型の並列化が可能なものは、各演算装置で独立して処理を行うことができるが、集約型演算やスキャン型演算では、ある演算装置の出力データ算出に他の演算装置の出力データを必要とするため、演算装置間でデータ通信が必要となる。

ここで（1.6.1）で示した基本的な画像処理を基本演算パターンに分類する。

まず、投影変換であるが、逆変換による再配列法によれば、出力画像のある部分領域に対応する入力画像上の部分領域を各演算装置に与えることができれば、出力画像の各画素について、最近隣内挿、共1次内挿、3次たたみ込み内挿といった内挿法を用いて対応する画素値が計算可能であり、これらの処理は各演算装置で独立実行可能である。座標変換式のパラメータは出力画像と入力画像との部分領域の対応を計算するために必要となるパラメータであるため、各演算装置に与える必要がないことを考えると、本演算は、一括型演算に分類できる。

次に色補正を変換関数によって実現した場合、各関数を定義するために必要となるパラメータと入力画像の部分領域を各演算装置に与えることで、各演算装置の処理が独立に行える。このため、本演算は分散型演算に分類できる。

色補正をヒストグラムを用いて実現した場合、ヒストグラムの作成を行った後、作成したヒストグラムを使ってヒストグラムを平坦化するための画素値変換テーブルを作成し、このテーブルに従って画素値を変更する必要がある。ヒストグラム作成を分散して行うためには、各演算装置に入力画像の部分領域を与え、局所ヒストグラムを作成した後、これを1つの演算装置に集約して大局的なヒストグラムを作成するという手順を踏む必要があり、集約型に分類される。また、ヒストグラムを平坦化するための画素値変換テーブルを作成する処理は、原画像の最小濃度値のほうから順次各濃度値の頻度を加算していく必要があります、分散処理には適さないと考えられる。この変換テーブルが作成されれば、変換テーブルおよび入力画像の部分領域を各演算装置に与え、各演算装置が独立して画素値の変

換処理を行えるため、分散型の演算に分類できる。従って本処理は、集約型演算と分散型演算を組み合わせて実現される。

鮮鋭化をアンシャープマスキングで行う方法は、部分領域に対して演算マスクを適用するのみであるので一括型演算に、選択的画像鮮鋭化法は、アンシャープマスキングの程度をコントロールする情報を追加したものであるので、分散型にそれぞれ分類できる。

テンプレートマッチングによるモーショントラッキングは、1つの探索範囲内で生じる複数の残差計算を各演算装置に分散させた場合、残差計算結果を集約して大小比較しなければならないため集約型の演算に分類されるが、複数の探索範囲が設定された場合において、各探索範囲の残差比較計算までを1つ1つの演算装置に分散させることを考えれば一括型演算に分類することができる。以上の分類結果を表2にまとめる。

表2 投影変換・色補正・鮮鋭化の演算分類

画像処理名称		一括型	分散型	集約型	スキヤン型	展開型
投影変換		○				
色補正	変換関数		○			
	ヒストグラム			○		
鮮鋭化	ヒストグラム作成処理					
	コントラスト変換		○			
テンプレートマッチング	アンシャープマスキング	○				
	選択的画像鮮鋭化		○			
テンプレートマッチングによるモーショントラッキング		○	○	○		

(1.6.3) 分散レンダリング方針の検討

ここでは、各演算装置がネットワークを介して接続されるクラスタ環境内で、一般のノンリニア編集システムのように、入力画像に対して複数の画像処理を順番に実行する場合に効率的な分散レンダリング方法を考えてみる。

クラスタにおいては、計算機間のやりとりがネットワークを介したものとなるため、このようなネットワークアクセスが処理速度低下の要因となる可能性が高い。このため、こ

こでは、極力ネットワークを介した計算機間アクセスを避ける方針で検討を行う。

ノンリニア編集システムにおけるレンダリングを、クラスタ内の各計算機で分散させて行う場合、各計算機で行われる画像処理の大きさとして次の 2つが考えられる。1つは(1.6.1)で示したような基本的な画像処理 1つ1つを各計算機に行わせる方法であり、もう1つはこれら基本的な画像処理を複数まとめて 1つの大きな画像処理と考え、これを各計算機に行わせる方法である。

前者の方法は、例えば Cineon の Flowgraph 上で作成した画像処理フロー内の画像処理 1つを各計算機に行わせることに相当し、後者の方法は、画像処理フローの全ての画像処理を 1つの計算機に行わせることに相当する。

次に、与えるデータの大きさにも 2つの方法が考えられる。1つは、入力画像を 1 フレーム単位で与える方法であり、もう1つは、1 フレームの入力画像を部分領域に分け、それを各計算機に与える方法である。

前者の方法は、例えば 1 フレームから 20 フレームまでのレンダリングを行う場合に、1 フレームのレンダリングを計算機 1 に、2 フレームのレンダリングを計算機 2 に、n フレームのレンダリングを計算機 n に実行させるものである。後者の方法は、例えば横 4000 ピクセル、縦 3000 ピクセルの入力画像を横 128 ピクセル、縦 128 ピクセルの部分領域に分け、それぞれを各計算機に与える方法である。

以上を組み合わせることにより、以下に示す 4つの分散方式が考えられる。

[分散方式 1] 各計算機は、1つの基本画像処理の実行を担当する。処理されるデータは、
入力画像 1 フレームを単位として行われる。

[分散方式 2] 各計算機は、1つの基本画像処理の実行を担当する。処理されるデータは、
入力画像を適当な大きさに分割した部分領域を単位として行われる。

[分散方式 3] 各計算機は、複数の画像処理の実行を担当する。処理されるデータは、入力
画像 1 フレームを単位として行われる。

[分散方式 4] 各計算機は、複数の画像処理の実行を担当する。処理されるデータは、入力
画像を適当な大きさに分割した部分領域を単位として行われる。

ここで、分散方式 1 の方法による分散画像処理の例として分散画像処理環境 VIOS[松尾 1992]が挙げられる。VIOS は VPE、OM、IPU と呼ばれる 3つのプロセスを持つ。画像処理エンジンである IPU はシステム内で複数起動されており、ある IPU の出力画像を他の IPU へ転送することにより、VPE と呼ばれるエディタで編集された順番に画像処理が実行される。OM は VPE から送られてくる処理命令を解析し、IPU の管理および処理スケジューリングなどを行う。VPE-OM 間、OM-IPU 間、IPU-IPU 間の画像データ以外の通信にはリモートプロシージャコールが用いられ、IPU-IPU 間の画像データ転送にはソケットによる通信が用いられている。

また、一般的なノンリニア編集システムにおいて、分散方式3による分散レンダリングを行うものがみられる。

分散方式1および2では、各計算機が1つの画像処理の実行を担当する。このため、複数の画像処理を順番に実行する場合、ある計算機の出力データが他の計算機の入力データとなり、1フレームの入力画像データ（分散方式1）またはその部分領域（分散方式2）が、各計算機を移動しながら処理が進行する。このため、1フレームの出力画像を作成するために頻繁にネットワークを介した計算機間アクセスが生じることになってしまう。

次に分散方式3および4では、それぞれの計算機において、与えられた入力画像（分散方式3）またはその部分領域（分散方式4）に複数の画像処理が順番に実行される。それぞれの計算機で画像処理フロー内の全ての画像処理を行わせれば、各計算機の演算結果が、出力画像（分散方式3）およびその部分領域（分散方式4）に対応することになる。

分散方式3のように1フレームの入力画像を単位として画像処理を行う場合には、実行される各画像処理が各計算機内で閉じており、処理途中で他の計算機にアクセスする必要は無いと考えられる。

しかし、分散方式4のように、入力画像を複数の部分領域に分けて各計算機に与えた場合、そこで行われる1つ1つの画像処理は、(1.6.2)で示したように様々な分散方式で実現されることになる。このため、それぞれの計算機で実行される複数の画像処理中にパイプライン型の並列化で実現される集約型演算、スキャン型演算が含まれていた場合、その処理を実行するために他の計算機にアクセスしなければならない。

これは、ノンリニア編集システムで使用される全ての画像処理を、一括型演算、分散型演算、展開型演算のみで実現することで解決されるが、これは非常に困難であると思われる。

以上の検討より、分散レンダリングの方式としては、処理実行中の計算機間アクセスがない分散方式3の採用を考える。分散方式3では1つの計算機に1フレームの出力画像の作成を担当させ、これを複数の計算機で平行して実行させることができる。このため、(1.4)で示したノンリニア編集システムのレンダリング工程の高速化が実現されると考えられる。更に我々が想定しているIPD用の映像編集作業では、図2に示すように映像編集工程、映像分割工程、動画作成工程の3つの工程に分類することができる。開発するシステムにおける編集作業もこの工程分類に従うと仮定すると、これらはそれぞれ独立のジョブとして考えることが可能なため、クラスタの各計算機にそれぞれの工程を分散させることができるものである(図22)。

各工程は、処理内容により実行時間が様々に変化する。このため各工程を実行する計算機の台数を制御することによって各工程の負荷を調整することが可能だと考えられる。これによって各工程の負荷を均等に配分することができれば、相当なレンダリングの高速化が期待できる。

なお、入力画像データ、各工程の出力画像データの保存先としては、ファイルサーバー上、各計算機のローカルハードディスク上、テープデバイス上などいくつかの場所が考えられる。例えば、全ての入力画像データと各工程の出力画像データをファイルサーバー上に置く方法もあるが、入力画像データを映像編集工程を実行する計算機のローカルハードディスクなどに転送し、映像編集工程の出力画像もローカルハードディスク上に作成させたのち、あるタイミングで出力画像データをファイルサーバーに転送するほうが、工程実行中のファイルサーバーへの余計なアクセスが減り効率的なレンダリングが可能かもしれない。このように、入力画像データをどこに置き、それぞれの工程で作成される出力画像をどこに置くのが効率的であるかの検討も行う必要がある。

さらに、ノンリニア編集システムにおいては、高信頼性が実現されることが非常に重要である。この観点からレンダリング実行中のPCに不具合が発生し、そのPC上の処理続行が不可能となった場合などの対処方法なども合わせて検討していく必要がある。

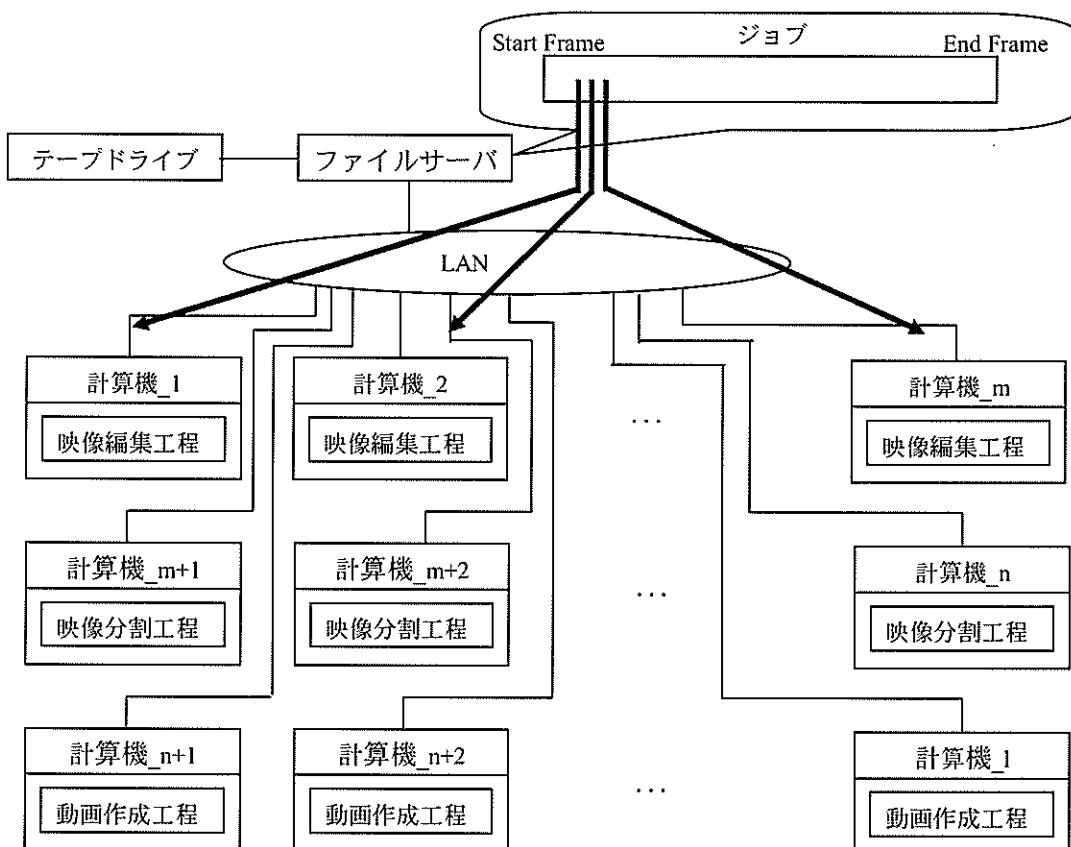


図 22 従来の制作工程を各計算機に分散する例

(1. 7) おわりに

本節では、高解像度・大容量のコンテンツを効率的に作成するために必要なノンリニア編集システムに必要となる機能について、我々が過去に行ったコンテンツ制作、一般的のノンリニア編集システムの機能を調査することにより検討した。

その結果、PC クラスタを用いた分散レンダリングとテープアレイの活用によるハードディスク資源の効率的管理の自動化が必要と考えた。

PC クラスタでは、各計算機間のアクセスがネットワークを介したものとなる。このため処理の高速化の観点から、レンダリング処理中の不要な計算機間アクセスを避ける方針で分散処理方式を検討した。

その結果、各計算機に 1 フレームの入力画像に対する複数の画像処理を実行させる方法（分散方式 3）を採用することとした。

(2) 研究開発設備

以下、課題ア－1 および 3 の研究・開発を行うために選定した設備について述べる。

本システムでは、映像編集作業を行うサーバー PC と、そこで行った編集内容に従いレンダリング処理を行う複数のレンダリング用 PC をネットワークにより接続した PC クラスタで構成している。

サーバー PC には、ディスクアレイとテープアレイが接続される。このため、サーバー PC では映像編集処理、各レンダリング PC で行われるレンダリングの監視および制御、テープライブラリの制御を行うとともに、各レンダリング PC に入力映像データを与えるファイルサーバーとしても利用される。このため、CPU に PentiumIII 1.4GHz2 基を搭載したマルチプロセッサ PC（株式会社日本コンピューティングシステム製 VC71400TDS [Jcsn]）を選定した。

また、高速な画像処理を行わせるレンダリング PC には、現在最もハイエンドの CPU の 1 つである PentiumIV 2.0GHz 1 基搭載した汎用 PC とした。PC クラスタでは、複数の PC が 1ヶ所にまとめられるため、熱暴走などの危険性を考慮し、ボルバーリング FAN を 2 基搭載した放熱性の高い金属製ラックを使用し、ハードディスクを強制冷却するなどの熱対策を行っている製品である株式会社アークブレイン製の RS2000NW-19R [Arcbrain] を選定した。本開発においては、入出力画像の作成場所に各レンダリング PC のローカルハードディスクの検討を行うため、160GB の大容量ハードディスクを搭載している。160GB という容量は横 4000 ピクセル、縦 3000 ピクセルの画像データ（非圧縮、1 ピクセルを 3Byte で表現）を約 4400 枚程度保存できるデータ量である。

PC クラスタでは、NetBSD [Netbsd]、FreeBSD [Freebsd]、Linux [Linux] などのフリーの Unix ライクなオペレーティングシステムを採用しているものが多く見られる [手塚 2001] [Doshisha]。これは、PC クラスタの構築費用を安く抑えるためであると思われる。

しかし、ここでは普及率などを考え、レンダリング用 PC のオペレーティングシステムに Microsoft 社の Windows2000 Professional [Microsoft a]、サーバーPC のオペレーティングシステムに Windows2000 Server [Microsoft a] を採用した。

PC クラスタにおいては、各 PC をつなぐ LAN に Myrinet を採用するものが多く見られる [手塚 2001][Doshisha]。

Myrinet [Myri] は Myricom 社が開発・商品化したギガビット LAN である。Myrinet のホストインターフェースには LANai と呼ばれる RISC プロセッサが搭載され、これが Myrinet 上の通信プロトコルを制御する。ホストインターフェース間を接続するスイッチはカットスルールーティングを行うクロス型スイッチであり、ネットワークトポジを比較的容易に構成することができるようである [手塚 2001]。

しかし、我々は汎用性を考え、現在最も普及しているイーサネットの活用を検討することとし、LAN にはギガビットイーサネットを用いる。ネットワーク内に不要なパケットが流れることを防ぐために、スイッチングハブ (3Com[3com]製 3C16468) を選定し、このスイッチングハブを介して、サーバーPC、各レンダリング PC を接続する。

データの保存を行うテープには現在利用可能なものとして、CMT、DAT、SLR、AIT、DLT、SDLT、LTO、DTF、などがある。それぞれの非圧縮データに対する転送容量を表 3 に示す（表中の数値は [Hitachi a][Fujitsu][Sun][Sony a][IBM][Compaq][Toshiba][Sony b][Sony c] より引用）。

表 3 テープの転送容量（非圧縮）

テープ	非圧縮データ転送容量 (MB/s)	テープ	非圧縮データ転送容量 (MB/s)
CMT	3	SDLT	11
DAT	3	LTO	15
SLR	5	DTF-1	12
AIT	6	DTF-2	24
DLT	6		

このうち、DTF は放送業務用 VTR ディジタルベータカムの記録技術をベースとした DTF フォーマットを採用した高速・大容量テープであり、映画制作・ビデオ編集業界での普及率が高いものの 1 つである。また、DTF には DTF-1 と DTF-2 の 2 つの方式があるが、DTF-2 は、他のテープと比べて非常に高速なデータ転送が行えるため、大容量画像データの転送には有利だと考え、テープドライブにソニー株式会社製 DTF-2 テープドライブ GY-8240UWD [Sony d] を選定した。本ドライブで使用されるカセットには L カセットと S カセットの 2 種類があるが、L カセットは非圧縮で 200GB、S カセットは非圧縮で 60GB の

データを保存可能である。

GY-8240UWD のテープライブラリとしてソニー製 DMS-B35 [Sony d] を選定した、製品力タログによると DMS-B35 は DTF-2 カセットを 35 巻収納することができるため、最大で 7.0TB という大容量のデータを保存することが可能である。ホストコンピュータから SCSI を介して制御することができるが、ペタサイトコントローラと呼ばれるコントローラを接続することによりネットワーク (TCP/IP) 経由でのリモート制御も可能となる。

また、ペタサイトコントローラを使用することにより、テープライブラリ内を論理的に分割することにより、複数のアプリケーションで 1 台のテープライブラリを共有するシェアリング機能、システム管理者などに対し、障害発生時の自動通知や定期的なシステム情報の通知を行うことができる E-Mail による通知機能、テープの張り付き防止等のために巻き直しを自動的に行う自動リテンション機能などが利用可能である。

また、入力画像や出力映像の入出力先となるハードディスクには、RAID 5 が構成可能なディスクアレイとして株式会社日本コンピューティングシステム製 VCSR18010 を選定した。[Jcsn] によると VCSR18010 は、181GB ハードディスクを 10 基搭載しており、最大約 1.8GB の容量を有する。さらに最大 15,000rpm のハードディスクドライブの使用を想定した熱対策を施したモデルである。

テープライブラリを使用したことにより、長期間の連続レンダリングが可能となったとしても、ハードディスクの故障によってシステムを停止させなければならない状況を極力さけるため、システム稼動中にハードディスク交換可能なホットスワップ機能、動作中の RAID システムの自動再構築を行うオンラインオートリビルド機能、予備のハードディスクドライブを常に待機させておき、稼動中にディスクドライブが故障した場合にそのドライブと予備として待機させておいたドライブの交換を行い RAID システムの再構築を自動的に行うホットスペアドライブなどの冗長性を有する製品とした。ディスクアレイには、多くの映像データの入出力が発生することが予想されるため、現在利用可能な最速のインターフェースである Ultra160SCSI (最高転送速度 160MB/sec) により接続可能なものとした。

編集する映像の撮影設備として、SONY 製ハイビジョンカメラ HDW-F900 を選定した。本製品は、映画と同じ 24 フレームプログレッシブモードでの撮影が可能な製品として定評のあるものの 1 つである。さらに上記カメラで撮影した映像をデジタル化するためにハイビジョンレコーダ (SONY 製 HDW-F500) およびハイビジョンスキャナ (株式会社新輝製 HD Station Pro [Shinki]) を選定した、これにより、ハイビジョンテープで再生される映像をリアルタイムにスキャンニング可能である。また、ハイビジョンスキャナにはギガビットイーサネットカードを搭載させたため、ハイビジョンスキャナに取り込み、PC で扱えるデジタル映像ファイル形式に変換したデータを高速に取り出すことが可能である。

5 - 1 - 1 - 3 課題ア-1 に関する研究開発実施内容のまとめ

本年度は上記報告のとおり、画像処理並列化技術に関して、並列化可能な画像処理項目を一般のノンリニア編集システムの機能調査や、弊社が過去に行ったディジタル映像制作時の処理内容などの分析により列挙し、その実装に必要となる公知技術について調査を行った。

また、画像処理並列化技術ならびに超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術についての研究開発遂行に必要となる、PC やデータストレージ設備などの選定を上記報告のとおり行い、その調達を実施した。

5 - 1 - 2 ア-2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

本研究では、IPD 用映像の持つ特徴のなかで、超高精細、広視野角という 2つの点に着目し、このような映像を ①複数のビデオカメラを用いて撮影する、②移動するカメラを用いて撮影する、の 2つの異なるアプローチにより取得する方法の確立に取り組む。

アプローチ毎に下記のとおりテーマを分け、研究を進める。

- ① 複数のビデオカメラを用いた超高精細・広視野角映像撮影技術
- ② 移動カメラを用いた超高精細静止画像撮影技術の研究開発

5 - 1 - 2 - 1 本年度の研究開発目標

(1) 公知技術調査

次年度以降の研究開発内容の中心となる、複数のビデオカメラなどを用いて超高精細・広視野角の映像を取得する技術について、主に現在世界的に注目されている Omni-directional Vision（全方位映像）に関する論文や関連製品についての調査を行うことで、関連公知技術をサーベイする。

(2) 実験設備の選定と調達

テーマ① については、複数のビデオカメラによって撮影された映像の変換処理を行うことで 1 枚の超高精細・広視野角映像を取得する技術の開発に必要となる、ビデオカメラを中心機器を選定し、その調達を行う。テーマ② については、移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続する技術の開発に必要となる、カメラ、ロボット等、実験・開発設備の選定と調達を行う。

5 - 1 - 2 - 2 実施内容

(1) Omni-directional Vision に関する公知技術調査

(1. 1) はじめに

全周パノラマ像を一度に得ることの出来る全方位視覚センサは、広視野を必要とする移動ロボットのナビゲーションや安全監視、仮想空間構築等への応用が期待され、コンピュータグラフィックス、コンピュータビジョンなどさまざまな分野において近年特に研究が加速されている。本研究が対象とする IPD 用ディジタル映像コンテンツ制作において、広視野角の映像を高解像度でリアルタ

イムに得るために必要な要素となる。このため、世の中にどのような全方位視覚センサがあるか、また全方位視覚センサより得られた全周囲映像を利用した様々な視覚システムへの応用について知ることは、重要である。

従来は、一台のカメラで周囲を複数回に分割して撮影したり、複数のカメラで同時に撮影したり、旋回機能を有する撮影装置で撮影することにより全周囲の画像を得ていたが、凸面ミラーとカメラを組み合わせて利用することにより1ショットで周囲360°の撮影が可能になった。このように容易に全周囲画像を利用できるようになったため、広視野を必要とするシステムへの応用の研究がさまざまな分野で進められている。

例えば、没入度の高いコンテンツを作成するにあたり、体験者の操作により任意の位置に自由に移動できたり、全周囲を映像で覆つたりすることは、没入度や臨場感を得るために大変効果的である。このため、容易に全周囲の画像を撮影できたり、リアルタイムに任意の視点の映像を表示できる全方位視覚センサを上手く利用することは、コンテンツを作成する上で重要な要素となるため、全方位視覚センサの技術動向を把握していることは必須である。

報告では、臨場感ディスプレイシステムにおける広視野角映像の取得手段にその技術を適用していくため、技術トレンドならびに製品サーベイを行ったので、その結果を報告する。なお、2001年以前の研究に関しては、[八木 2001]にもまとめられている。また、[Columbia-U]にも、技術サーベイをまとめたものがあるので、参考されたい。

(1. 2) 全方位視覚センサとは

全方位視覚センサとは、全方位(360°)の画像を映し出す装置を指し、英語では、OmniDirectional Vision Sensor という。[横矢 2000]によると、全方位視覚センサとはもともと 360° × 360° の全方向を撮影するセンサを意味するが、広義では側方360°を撮影するセンサも含まれる。

広範囲の光景を死角なしに撮影することが可能である装置として、全方位視覚センサの他に、魚眼レンズを用いたものがある。両者の違いは、魚眼レンズは、レンズ自体を湾曲させ、レンズ正面部を中心とした前面の全光景を撮影するものであるのに対し、全方位視覚センサは、表面が鏡面になっている回転体とカメラを組み合わせて、カメラの横方向を全周囲にわたり撮影するものである。撮影された映像を比較すると、魚眼レンズを用いて撮影した映像には歪みが生じるが、全方位視覚センサを用いて撮影した映像には歪みがないのも特徴である [Accowle a]。

ところで、全方位センサを発明し基本特許を持つのは、和歌山大学システム工学部の石黒浩教授である。石黒教授が取締役として参加しているベンチャー企業にヴィストン株式会社があり、全方位センサ関連の特許出願は、2001年8月現在10件を超えており、また、自由鏡面ミラーカメラを開発し、現在特許出願中である。従来の広角カメラ(120°)や全方位カメラなど広域を撮影するカメラを用いて撮影した場合、被写体が大きく歪むため、歪みの補正が必要になる。自由鏡面カメラ(図1)は、通常にカメラに特殊な形状の鏡面を組み合わせることにより、撮影画角を140°まで広げ、しかも歪みなく撮影することが可能である [Vstone]。

(1. 3) 撮像系について

実環境において広範囲な情報を撮影する方法として、1台のカメラを用いる方法と複数のカメラを用いる方法がある。

1台のカメラを用いる方法には、1台のカメラで周囲を複数回に分割して撮影する方法、旋回機能を有する撮影装置で撮影する方法、凸面ミラーとカメラを組み合わせてワンショットで全方位を撮影する方法がある。この中で、前者2つの方法で全方位の撮影を行った場合、同時に全ての方向の映像を得ることが出来ないため、動体の存在する空間を認識するには向きである。

複数台のカメラを用いる方法には、様々な方向に向けたカメラを組み合わせて設置し、同時に撮影することにより、全周囲の映像を得る方法である。この方法は、装置が大掛りになる上、撮影した画像をつなぎ合わせる必要があるが、1台のカメラで撮影するのと比較して高解像度の映像を得られるメリットもある。

凸面ミラーとカメラを組み合わせて全方位を撮影する方法は、カメラの上に回転体形状である凸面ミラーを設置し、ミラーに写った像を撮影することにより一度に全周囲画像を得る手法であり、この時カメラと凸面ミラーの中心軸は垂直な位置に設置される。本報告ではこの方法を用いたものについて主に述べる。

凸面のミラー形状には、主に、球面、円錐面、双曲面、放物面等の回転体、平面の組み合わせがある。この中で、球面ミラーと円錐面ミラーを用いたものは、光学特性が1点への中心投影ではない、すなわち単一視点制約を満たさないため、全方位画像から単一視点での全周パノラマ画像を生成することが出来ない。したがって、ミラーとレンズの組み合わせで、透視投影画像やパノラマ画像を生成するためには、ミラー形状は、平面、双曲面、放物線が好ましい [横矢 2000]。また、球面ミラーと放物面ミラーを用いた装置を比較すると、得られる画像は、球面ミラーを用いた装置の方がより歪みが大きい [Hicks 2001]。[市川晃 1999] では、2枚の曲面反射鏡からなる全方位視覚システムの設計において、結像性能の良好な視覚システムを得るために反射鏡形状の検討を行っており、楕円面、双曲面、放物面、4次曲面等で比較した結果、4次曲面が最も効果的であったとの報告もある。なお、双曲面ミラーは、山澤氏、八木氏、谷内田氏によって、最初に作られている [Kyoto-U]。

全方位視覚センサは、凸面ミラーの下にカメラを設置するタイプのものが一般的であるが、凸面ミラーを支える為に、凸面ミラーとカメラが透明な円筒状のもので覆われていることが多い。ところが、この円筒により、円筒に反射した光(ゴースト画像)がミラーに写ってしまい、このゴースト画像が実画像と重なり、正確な全方位画像を得ることができない場合がある。このようなゴーストを解消する為には、図1のように、凸面ミラーの中心部分に針のような円錐の突起「センターニードル」を設置するとよい。「センターニードル」はゴースト画像を遮る働きをする [Accowle a]。

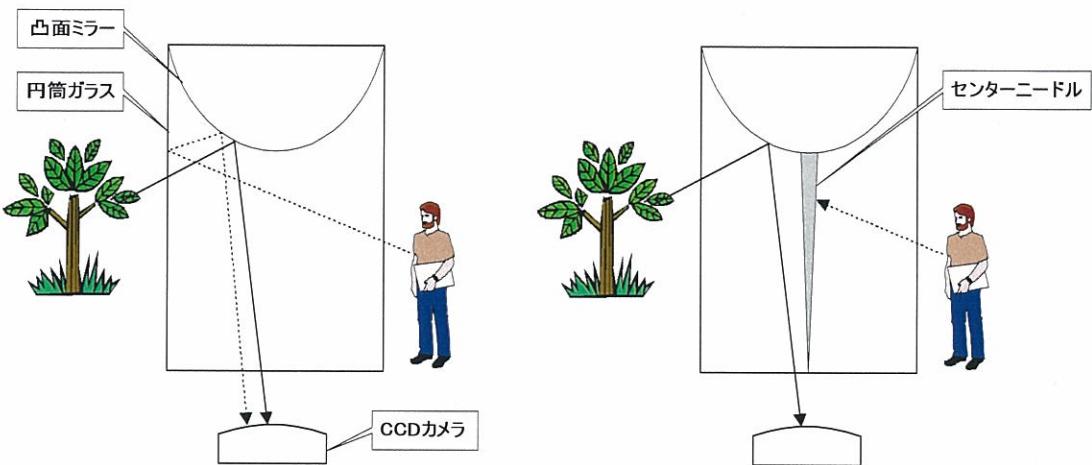


図 1 左：センターニードルがない場合 右：センターニードルがある場合

全方位視覚センサを複数組み合わせたものとしては、半球の視界を越えた撮影を可能にするために2台の全方位カメラを背中合わせに設置したものや [Nayar 1997a] [Nayar 1997b] 、ステレオ画像を得るために6角錐のミラーと6個のカメラから成る全周囲画像センサを2組を背中合わせに設置したものがある [shimamura 2000 a] [shimamura 2000 b] 。

全方位視覚センサと、異なる性質を持った別のセンサを組み合わせた複合視覚センサも複数報告されている。全方位視覚センサ COPIS とステレオ視の可能なセンサを組み合わせ一体化して制御することにより、全方位視覚センサで周囲の画像を一度に得ることと、全方位視覚センサでは大きく歪みの生じる部分に関してはステレオセンサによって局所的な画像を得ることが可能であり、両者の短所を補いあう構成となっている [八木 2001 b]。また、全方位センサ SOIOS とコントロール可能な PTZ カメラ(パン・チルト・ズーム一体型カメラ)を組み合わせて設置することにより、例えば監視システムにおいては、全方位センサで 360° を死角なく監視し PTZ カメラで必要部分をクローズアップするなど、監視に最適な使用方法の提案もある [Suekage]。

全方位視覚センサのキャリブレーション手法もいくつか考案されており、[戎野 1999] では、全周ステレオ画像センサのキャリブレーション手法として、円筒スクリーンを用いた方法を提案している。6角錐のミラーと6個のカメラから成る全周囲画像センサを2組用いて、そこから得られる画像間のキャリブレーションにおいて、大型円筒スクリーン上に投影されている位置が既知である格子パターンをもちいることにより、蓄積誤差のないキャリブレーション方法を提案している。また、特殊な形状をした全方位ステレオシステム S.O.S.(Stereo Omnidirectional System) のキャリブレーション方法は、[棚橋 2001e] にて提案されている。

[松山] のプロジェクトでは、分散強調視覚システムの構築を目的に、必要となる技術の開発を行っている。撮影技術では、高精細カラー画像や3次元距離画像、 360° 全方位パノラマ画像を撮影可能なカメラシステムを開発した。

これらの撮影装置を用いて得られた映像を使った応用例について、次の項で述べる。

(1. 4) 全方位視覚センサの視覚情報メディアへの応用

全方位視覚センサ技術の躍進に伴う、レンズ形状の開発、装置の小型化、撮影映像の高品質化等により、容易に高品質な全方位映像を得られるようになってきた。このため、さまざまな視覚情報メディアへの応用が急速に進んできている。ここでは、各分野毎の応用事例を挙げる。

(1. 4. 1) 監視システムへの応用

防犯や動体の動線解析を目的としたカメラを用いた監視システムにおいて、カメラのデジタル化が進むにつれて自動化による監視作業の低減が期待されている。一度に広範囲を撮影できる全方位視覚センサは、効率よく多くの情報を得ることが出来るため、セキュリティ用途での利用が多く検討されている。

シャープでは、周囲 360° の映像を撮影でき、リアルタイムの画像変換と高機能なセンシングを実現する全方位カメラシステムを開発した。1992 年より大阪大学(谷内田研究室)と共同で基礎研究を進めており、実用化レベルのカメラシステムの実現に至っている。防犯をターゲットとした本システムでは、広範囲に撮影した画像のなかから人物を感知したり、追尾したり、画像を拡大することが可能である。また、リアルタイムでの透視投影画像の表示も可能となっている。セキュリティ用途の他には、テレビ会議システムや車搭載などへの応用展開を図っている[Sharp]。

マサチューセッツ工科大学の Vision Lab. では、全方位視覚センサより得られるパノラマ画像を用いた空間観察及び状況認識の研究を行っている。具体的には、動体の検知及びトラッキング、動体の 3 次元認識、扉の開閉の認識、ロボットの移動に伴う障害回避や経路探索、などがある[Zhu 2000]。

[寺沢 2001] によると、遠隔監視システムへの応用として、移動体がどんな位置に存在してもその位置を安定して推定するために、全方位画像センサを 3 台用いた手法を提案している。2 台のセンサを用いただけでは、両センサの位置を直線で結ぶベースライン付近に存在する物体の位置やオクルージョン、向きに関する情報推定に誤差が生じるが、3 台に増やすことにより解決する。

また、[市川徹 2000] では、監視システムへの応用として、広範囲を同時に撮影する為に高解像度の全方位画像センサを用いた行動分析方法について述べている。

(1. 4. 2) 環境モデリングへの応用

全方位視覚センサは 360° の視野を一度に得ることが出来るため、より容易に広範囲のモデリングを行うことが出来る。特に、3 次元幾何モデルの作成においては、空間内の垂直情報をもとに行なうのが主流となっている。

[戴 2001] では、全方位視覚センサを用いた研究の一つとして、街を写実的にモデル化するモデリング手法「Town Digitizing」技術について述べている。まず、全方位視覚センサを用いて街の撮影を行い、仮想空間の構成要素となる全方位画像を作成する。複数の場所にて撮影された全方位画像を用いた画像補間によって高速に街のモデル化を行うイメージベースのモデリング手法である。上記により作成されたデジタルタウン内の Walkthrough も可能である。

[池内 2001] では、イメージベースのモデリング方法に幾何形状を付加した空間の生成方法につ

いて述べている。撮影された全方位画像(円)を時間軸方向に重ね合わせて時空間画像(円柱)を作成し、半径を垂直方向に切断することによりパノラマ画像を得ることが出来るが、移動しながら撮影を行うため、パノラマ画像は垂直線が傾いた状態となっている。この傾きを求めるこにより、奥行き情報を得ることが可能であり、この情報を利用して2次元画像とマッチングすることにより、より正確なモデルの構築が可能である。

[中尾 2001] では、撮影された全方位画像より、空間の3次元幾何モデルやテクスチャを抽出することにより、3次元環境をモデル化する手法について述べている。本手法の特徴は、イメージマイキング及び画素ずらし手法を用いることにより、低解像度の全方位画像の高解像度化を行っていることである。

また、全方位視覚センサをロボットに搭載することにより、カメラの移動に伴う撮影空間内の垂直エッジの変化を手がかりに、空間の地図を生成する方法が提案されている [八木 2001 b]。

(1. 4. 3) 複合現実又は没入システムへの応用

ソニー株式会社では、視点が360°自由に変更可能な映像コンテンツの制作サービス事業「FourthVIEW」[Sony e]を行っている。全方位画像を撮影する装置は、8台のデジタルペータカメラを中心の支柱の周りに下に向けて設置され、下には斜めに取り付けられた平面の鏡が設置されるという構成となっている。この装置により撮影された全方位画像をベースに、独自開発のオーサリングシステムや再生ソフトウェアを用いて、利用者が自由に視点移動可能なコンテンツを制作する。現在、提供可能な再生プラットフォームは PlayStation2 [Sony d] であるが、今後、DVD-ROMなどのパッケージメディアへの展開やネットワーク配信にも対応する予定である。

330°大型円筒スクリーンから成る全周景観提示システムの構築において、提示画像として、6角錐のミラーと6個のカメラから成る全周囲画像センサを2台組合せて撮影した全方位ステレオ画像を用いている。全方位ステレオ画像は、奥行き情報をもった2.5次元のパノラマ画像に変換し、ここにCGにより作成したモデルを合成するものである [shimamura 2000 a] [shimamura 2000 b]。

[横矢 2001 a] では、全方位画像から透視投影画像の生成について述べており、画像生成の高速化を行うために、画像中に格子点を設置し格子点上でのみ対応する入力全方位画像内の座標を計算し、格子間の隙間は画像補間によって擬似的に生成する方法を用いている。

(1. 4. 4) ロボットへの応用

[米田 2000] では、全方位動画像を用いた移動ロボットの遠隔操縦方法として、ロボットの状態に応じた提示画像の表示の切り替えを行う。移動時には単眼動画像を提示し、静止時には任意視線方向のステレオ画像を提示することにより、移動時の機械的遅延や映像提示時の時間遅延なく、自由な見回しや奥行きの知覚を可能にする。

[土居 2001] では、移動ロボットの環境認識の研究を行っており、全方位視覚センサとステレオセンサを搭載したロボットが、距離計測を行いながら、局所的な環境地図の作成を行うものである。

[関森 2001] では、移動ロボットの障害物回避において、全方位視覚センサを搭載しセンサより得られる映像から床領域を抽出し、ロボットの移動速度から軌跡を予測することによって、ロボッ

トが障害物との衝突を回避する方法について述べている。また、障害物の位置情報を基に、事故位置の推定も行う。

Computer Vision & Robotics Research Group, Department of Computer Science, Trinity College Dublin[Trinity_C]では、1997年より全方位視覚センサの研究を行っている。最初のプロジェクトは、遠隔操作モバイルロボットの視野の拡大における全方位視覚センサの評価であった。全方位視覚センサを搭載したモバイルロボットの全方位視覚に基づいた操縦を行った。

(1. 4. 5) 複数の全方位視覚センサを用いた応用

全方位視覚センサの特徴として、数少ない撮影装置で広範囲の画像を得ることが出来るということが挙げられるが、さらにこれを多数用いることにより、全方位視覚センサを互いに観察することが出来るため位置関係が明らかになり、より正確な撮影物の3次元位置を測定することが出来る。

[興梠 2000] では、複数地点で撮影された全方位画像をもとに、コンテンツ作成の簡便化をはかる方法について述べている。画像間での対応関係を求めることにより、広範囲における環境の認識を一度で行うことができるため、コンテンツ作成の簡便化につながる。また、ジャイロセンサを用いることにより、画像間の位置あわせが失敗したとしても、安定した動作を可能とする。

[十河 2001] では、複数の全方位視覚センサが互いに観測可能であるかどうか、さまざまな観測条件を想定した実験を行い、全方位視覚センサの位置決めを行う手法について述べている。また、動体の観測に関して、さまざまな方向から同時に観測することができるため、胴体の位置や向きに依存しない認識が可能になる。冗長な視覚情報をもとに、全方位視覚センサが存在しない場所から見た映像を近似的に作り出すことも出来る。

(1. 5) 全方位センサ製品サーベイ

現在、さまざまな全方位視覚センサが製品化されており、その形状や構成も多種多様である。全方位画像を撮影するにあたり、その用途に応じて使い分けが必要な場合もある。ここでは、さまざまな全方位視覚センサを紹介する。

ヴィストン株式会社 [Vstone] では、4種のカメラ付き全方位センサ(型式：VS-C13N、VS-C32N、VS-C41N、VS-C41D80)を取り扱っている。センサ仕様はミラー径 31Φ～65Φであり、撮影範囲は水平方向 360° 垂直方向 70°(仰角 15° 傾角 約 55°)である。使用しているカメラは、80万画素のカラー CCD であり、映像出力は NTSC 又は IEEE1394-1995 仕様で画像サイズ XGA1024x768 である。

また、デジタルカメラやホームビデオに取り付けて使用する、全方位アタッチメント(型式：VS-C32MR, VS-C41MR)や、ネットワークカメラ、専用展開ソフトを組み合わせた、全方位ネットワークカメラもある。

末陰産業株式会社 [Suekage] が取り扱う大型全方位カメラ SOIOS138-Cam は、ロボットの目として大阪大学大学院基礎工学研究科の谷内田教授、八木助教授、山澤助教授らによって開発された。小型 CCD カメラと双曲面ミラーを組み合せたもので、撮影範囲は、水平方向 360° 垂直方向 90°(仰角 20° 傾角 70°)である。解像度は、画像サイズは 640x480 であり、実取り込みサイズは 480x480

である。ミラーの直径は138mmであり、最大外形寸法は240Wx344Hx2400(mm)で本体質量は約3400gである。

様々なカメラに対応できるミラー部分の生産だけでなく、各種変換ソフトの開発も行っている。また、全方位センサ SOIOS とコントロール可能な PTZ カメラ(パン・チルト・ズーム一体型カメラ)を組み合わせて設置することにより、全方位センサで 360° を死角なく監視し PTZ カメラで必要部分をクローズアップするなど、監視に最適な使用方法も提案している。

カナダの Point Grey Research 社が開発した Ladybug [Viewplus a] は、高精彩パノラマ動画像を連続して記録できる全方向デジタルカメラである。小型カメラヘッドに、水平方向に 5 個、上向きに 1 個の CCD を配置することにより (中心より 20mm にカメラを配置)、全方向の 75% 以上の視野の確保が可能であり、バッテリー駆動により、30 分の非圧縮画像を連続記録することができる。撮影素子は、Sony ICX204AK color CCD image sensor を 6 つ使用しており、水平方向に 5 つ、上方向に 1 つ配置している。1 つのカメラの解像度は、XGA (1024 x 768 ピクセル) であり、水平方向のカメラ画角は 120° であり、隣接するカメラから得られる映像は 10% ずつのオーバーラップがある。上向きのカメラと水平方向のカメラから得られる映像のオーバーラップは、あまりない。パノラマ動画生成アプリケーションが Microsoft 社より無償提供予定である。

Point Grey Research 社のステレオ技術を用いてソフトピアジャパン、岐阜大学の山本教授、株式会社ビュープラスが共同で開発した、S.O.S(Stereo Omnidirectional System) は、60 個の C-MOS イメージセンサを用いて、完全に同期の取れた全方位の距離画像とカラー映像を取り込むシステムである。3 個 1 組、20 組のステレオカメラユニットを正 20 面体上に設置してあるユニークな形状の全方位センサである[Viewplus a]。S.O.S に関する研究は、[棚橋 2000a] [棚橋 2000 b] [棚橋 2000 c] [棚橋 2001 a] [棚橋 2001 b] [棚橋 2001 c] [棚橋 2001 d] [棚橋 2001 e] [棚橋 2001 f] [棚橋 2002] [渡辺 2001] [山本 2001] にて報告されている。

株式会社アコウル [Accowle b][Accowle c] が取り扱っている全方位センサは、球面ミラー、双曲面ミラーの 2 種類を取り扱っている。カメラは SONY EVI330 を使用している。ユーザのニーズに合わせたカスタム設計も可能である。

FullView, Inc. [Fullview] で開発した、FullView は、正多角錐状のミラーを用いた全方位視覚センサであり、カメラの台数は多角錐の側面の個数分必要とする。撮影範囲は、水平方向 360° 垂直方向 60° (仰角 30° 像角 30°) である。

REMOTE REALITY 社 [Remotereality] が開発した、OneShot360 は、放物面ミラーを用いた全方位視覚センサであり、撮影範囲は、水平方向 360° 垂直方向 90° (仰角 15° 、像角 75°) である。全方位センサを回転台に載せることにより、360° × 360° を撮影可能にするオプションもある。

GENEX Technologies, Inc. [Genex] が開発した OmniEye は、防犯を目的とした全方位視覚センサである。360° (半球) を撮影し、無人監視を行うために、侵入を検知すると、自動的にアラームを鳴らしたり録画を開始したりする。出力する画像のフォーマットは、BMP, JPEG, GIM, RAW の 4 種類である。

複数のカメラにて全方位を撮影する視覚センサは、装置は大掛りであるが、複数のカメラにて撮影するため、1 台のカメラで撮影するのに比べてはるかに高解像度の画像を得る

ことが可能である。前述したビュープラス開発の S.O.S の他、以下のものがある。

Immersion Media Inc.が開発した DodecaTM1000 Camera はサッカーボールの ようなユニークな形状を特徴とする、12 台のカメラを組み合わせた全方位視覚センサである。撮影範囲は、水平方向 360° 垂直方向 290° であり、92%の広い視野の撮影が可能である。カメラ1台あたりの画角は76°、カメラ一台あたりの撮影画像の解像度は 768 x 494 である[Immersivemedia]。

Microsoft 社が開発した RingCam は、5 台の 1394 規格のデジタルカメラを用いてパノラマ画像を撮影するものである。1 台あたりの解像度は 640x480 であるため、3000x480 のパノラマ画像を作成することが可能である。本装置を PC に接続することにより、リアルタイムに複数のカメラで撮影された映像を接続し、パノラマ画像を作成することが可能である。

Fuji Xerox Palo Alto Laboratory が開発した FlyCam は、複数の CCD カメラを組み合わせて、全方位を撮影するものである。複数のカメラで撮影された映像に対して、リアルタイムにレンズ固有の歪み補正、隣りあう画像の境界部分のブレンドを行い、パノラマビデオ画像を生成する。生成されたパノラマ画像は Web サーバにより自動配信が可能であり、各クライアントの画面で視点の移動やズームを自由に行うことができる[FujiXerox] [Foote 2000]。

Optechnology, Inc. [Optechnology] が開発した、 Panoramic Annular Lens (PAL) は、全方位を撮影するための、パノラマ環状レンズである。標準的な PAL システムには、直径 40mm の PAL 及び内蔵のレンズを含んでおり、 PAL 内に形成された像は、内蔵のレンズを通して、撮影される。マサチューセッツ工科大学の Vision Lab. の全方位視覚センサを用いた認識の実験においても、 PAL を使用している。

(1. 6) 国内特許出願状況

全方位視覚センサの要となるミラー部分及び本体、そして、全方位視覚センサより得られる映像を用いたアプリケーションに関して様々な特許が出願されている。

国内特許の出願状況を 表 1 のにまとめる。

表 1 国内特許出願状況

発明の名称	特開 No	発明者	概要
全方位視覚センサー	2002-33943	シャープ株式会社 <熊田清> <田中伸一>	従来の回転体ミラーを利用した全方位視覚センサの死角を減らすため、凸面ミラーの中心部に切り欠き部を作り、撮影手段は切り欠き部を通して前方の画像を撮影可能にする。
全方位視覚システム	2001-337387	シャープ株式会社	防水対策がなされた全方位視覚シ

およびその保持装置		<熊田清>	ステムであり、保護構造が2重にならず小型であり、部品の交換が容易で視野が遮られることのない装置。
全方位視覚システム	2001-333303	シャープ株式会社 <熊田清> <賀好宣捷>	画像変換処理を高速に行って、画素数が増加しても動画像に十分追従することが出来、小型化を量ることが出来るような全方位視覚システムを提供するために、全方位画像をパノラマ画像や透視変換を行うための演算ロジック回路を含むハードウェアを所持することにより、ソフトウェアで処理を行う従来技術に比べて処理の高速化をはかる。
移動体の周囲監視システム	2001-331789	シャープ株式会社 <熊田清> <繁田徹>	移動体の周囲を容易に確認して安全性を高めるために、自動車のルーフ上やバンパー上に全方位視覚センサを設置し、撮影された画像データをパノラマ画像や透視画像に変換することにより、運転席から死角となる部分を容易に確認することを可能にする。
全方位視覚カメラ	2001-223922	松下電器産業株式会社 石黒浩 <曾我部靖> <石黒浩>	良好な画像が得られる全方位視覚カメラを提供するために、カメラの結像素子の上に遮光フィルタを設け、カメラと凸面ミラーを覆う透明な円筒部分の内周面に光の反射を低減する反射防止膜を設ける。
全方位視覚カメラ	2001-154295	松下電器産業株式会社 <曾我部靖> <村田茂樹>	簡便な構成で、軸周り360°の画像を撮影できる全方位カメラを提供するために、凸面ミラーとカメラにて構成され、透明材料によっ

			て凸面ミラーと円筒部と円筒部とカメラを接続する結合部の 3 つの部位を一体に形成して構成する。
全方位映像処理方法 と装置	2001-69531	松下電器産業株式会社 石黒浩 <曾我部靖> <石黒浩>	静止画を用いても高い臨場感を得ることが出来る全方位映像入出力方法を提供する方法。
全方位映像出力方法 と装置	2001-8232	松下電器産業株式会社 石黒浩 <曾我部靖> <石黒浩> <村田茂樹> <林謙一>	全方位画像から任意の視点の画像を切り出して再生する場合に、全方位が他の装置に記憶されている場合の情報の転送量を出来るだけ減らすために、表示位置情報のみの転送を行い視点位置を指定し、上記 2 つのデータを基に必要な画像を抽出して抽出された画像のみ送信を行う。
撮像装置	2000-350067	松下情報システム株式会社 <平本政夫> <中村州孝>	反射鏡で反射する光により形成される画像を撮影し、反射鏡を保護する保護部材に付着した異物を除去するために、保護部材に異物が付着しているかどうかの検査を行い異物を検出した時、反射鏡の下部に備えられたノズルの噴射口より、圧縮ポンベより供給された圧縮空気を噴射する。
全方位視覚センサ	2000-322564	愛三工業株式会社 <糟谷一郷> <柳原慶次郎>	複雑な狭小配管等の内部を検査するために、水平方向ならびに上下方向の全方位にわたって視覚情報を撮影できる装置を用いて、複雑な動きを伴わずに、単に挿入するだけで検査することを可能にする。
全方位撮像装置	2000-131737	株式会社アコウル	コンパクトで取り扱いが容易であ

		<石黒浩> <西原修>	り、カメラの焦点調整を確実且つ容易に行うことが出来る全方位撮像装置を提供するために、カメラは回転や進退が可能なようにカメラホルダに取り付け、カメラレンズは回転や進退が可能なようにカメラ本体部の先端に取り付けることにより、筒体とカメラホルダとカメラレンズが一体に回転できる拘束力を与える。
全方位視覚センサ	平 11-331654	八木康史 谷内田正彦 <八木康史> <谷内田正彦>	周囲 360° のパノラマ上の視野領域が観測できる全方位視覚センサにおいて、鮮明な映像が得られ、その映像に対し正確な中心射影の変換ができる光学系でありながら、光学系全体を小型で表現する。
全方位撮像画像伝送システムおよび全方位撮像画像伝送方法	平 11-205772	松下情報システム株式会社 <平本政夫> <磯崎大志>	複数の利用者があたかもそれぞれに割り当てられたカメラを自由に操作しているかのように、1 台のカメラを用いて、同時に別々の方向の映像を見ることができる全方位撮像画像伝送方法を提供するために、撮像した全方位画像データを圧縮し、圧縮された全方位画像データを送信し、圧縮された全方位画像データを解凍し、指定部分を透視投影画像に変換し表示する。
全方位撮像装置	平 11-174603	株式会社アコウル <石黒浩> <西原修>	回転対称体を有する凸面鏡をカメラと相対して配し、凸面鏡でカメラ光軸を中心とした全方位の光をカメラレンズに集光するようにした撮像装置において、凸面鏡とカメラとを連結する筒体の内面反射光による問題を生じることなく、

			鮮明で精度の高い撮像画像を得るために、凸面鏡の頂部に先端側が凸面鏡の軸線延長上をカメラ方向に延出する筒体内面反射防止用の棒状体を設ける。
全方位ステレオ画像撮影装置	平 11-95344	松下電器産業株式会社 <横矢直和> <竹村治雄> <山澤一誠> <岩佐英彦>	全方位のステレオ画像をリアルタイムに計測するために、曲率の異なる 2 つの双曲面ミラーを外側の焦点が一致するように配置し、その焦点部分にレンズ中心が来るようカメラを配置する。これにより、投影面に 2 つのステレオ対が同時に投影され、一度に全周囲のステレオ画像が撮影され、ステレオ対応点も容易に計測でき、高速に 3 次元座標を計算できる。または、角錐ミラー 2 つを上下対象に配置することにより、解像度の高い全方位ステレオ画像を撮影することができる。
全周パノラマ画像構成方法及び装置	平 11-4373	日本電信電話株式会社 <水上雅人> <金子和政> <西田安秀>	解像度の高い全周パノラマ画像をほぼ実時間で作成でき、かつ、装置自体の小型化、低コスト化が可能な全周パノラマ画像構成方法を提供するために、撮像装置の撮像面に対向する位置に平面ミラーを傾斜して設置し、ミラーを撮像装置の光軸を回転軸として 360° 回転させ、そこで撮影された画像を基にパターンマッチングを行い、各画像情報を繋ぎ合わせて全周パノラマ画像情報を得る。
全方位視覚センサを用いた位置検出方法	平 10-160463	技術研究組合新情報処理開発機構 <西村拓一>	カメラの撮影画像から精度よく位置検出を行うために、移動ロボットに設置した双曲面ミラーを介し

		<岡嶋一>	てカメラにより全方位画像を時系列に取得し、得られた画像データと標準パターンと比較し、一致した時の画像を採取した位置を検出結果とする。
全方位同時撮像方法	平 9-230443	伊神幸夫 <伊神幸夫>	一撮像器で、CCD 画像転送部品か、束の光ファイバーで、液晶か、すりガラス面かに、連続画像を得る方法。
全方位撮影装置及び全方位画像合成装置	平 8-125835	松下電器産業株式会社 <吉澤正文>	解像度が高く視点が一致したパノラマ画像を得るために、複数台のカメラを円周上に等間隔に並べ、全てのカメラの光軸をカメラを並べた円周面の法線方向に一致させ、個々のカメラと対を成す複数の平面鏡を外向きに接合した正多角錐型の反射鏡と、画像合成装置を備える。
全方位視覚系	平 6-295333	シャープ株式会社 谷内田正彦 <賀好宣捷> <谷内田正彦>	全方位の画像の同時撮影が可能な全方位視覚系を提供するために、2葉の双曲面のうちの一方の双曲面状の形状を有する反射ミラーと、2葉の双曲面のうちの他方の双曲面状の形状を有し中心が他方の双曲面の焦点に配置されたレンズとを備える。
全方位カメラ	特願 2001-091487	奈良先端科学技術大学院大学 <湊小太郎>	イメージセンサとして阻止配置を自由に設計できる CMOS を用い、画像の歪みを考慮してセンサを配置することで、センサ面上に集光する歪んだ画像から、透視投影変換画像やパノラマ画像を幾何変換することなく、実時間で撮像可能な全方位カメラ。

(1. 7) おわりに

本報告では、超高精細・広視野角の映像を取得する技術について、主に現在世界的に注目されている Omni-directional Vision において、視覚センサ、及び視覚センサより得られる映像を用いた具体的応用事例について述べた。これら調査内容を、今後の映像入力機能や編集機能に関する研究開発において、参考していきたいと考える。

(2) 研究開発設備

(2. 1) はじめに

本研究の1つである IPD 用映像コンテンツの制作において、超高精細、広視野角の映像を得るための方法の1つに、移動ロボットとカメラを組み合わせる方法がある。移動ロボットの上にカメラを装着し同時に制御することにより、遠隔操縦による撮影を行ったり、カメラより得られる映像を利用してロボットの位置を把握したり動作を制御たりすることが出来る。ここでは、本研究で利用するロボットの選定を行ったので、各ロボットの特徴について以下に述べる。

(2. 2) 6軸垂直多関節形ロボット RV-1A

(2. 2. 1) 特徴

三菱電機製 RV-1A は、産業用ロボットとしては、約 19kg と軽量・小型で、持ち運びも可能である。また、コントローラも、設置面積 A4 サイズ（拡張ボックスを除く）と、小型である。したがって、据付けしやすく、設置スペースも取らない。

(2. 2. 2) 構成

RV-1A は、以下のユニットにより構成される。

- ① ロボット本体
- ② コントローラ
- ③ ティーチングボックス

(2. 2. 2. 1) ロボット本体

[Mitsubishi a][Mitsubishi b] によると、ロボット本体は、全 6 軸を持ち、全軸 AC サーボモータを使用している。また、全軸アブソリュートエンコーダを搭載しているので、電源投入時に原点復帰動作を行う必要がない。6 軸合わせた最大合成速度は 2.2m/s であり、繰り返し位置精度も ±0.02mm と高精度である。ロボット本体は、コントローラ内にあらかじめ設定されたポイントと、ポイント

間の移動を記述したプログラムによりシーケンス動作を行う。ポイントの設定及びプログラムの入力は、コントローラに接続したティーチングボックス、またはコントローラに接続した PC より行う。アームの先端には、エアハンド、電動ハンド、またはユーザ製作のハンドを取り付けることができる。エアハンド、電動ハンド用の配管・配線はアーム内に内蔵されている。エアハンドを使用する場合には、コントローラにエアハンドインターフェースを内蔵する必要がある。ロボット本体の主要仕様を表 1 に示す ([Mitsubishi a][Mitsubishi b] による)。

表 1 ロボット本体仕様

項目	単位	仕様
動作自由度		6 軸
駆動方式		AC サーボモータ (J1～J3 及び J5 軸ブレーキ付き)
位置検出方式		アブソリュートエンコーダ
最大可搬質量（定格）*1	kg	1.5 (1)
アーム長	mm	250+160
最大リード半径	mm	418
動作範囲	J1	±150
	J2	180 (-60～+120)
	J3	95 (+60～+155)
	J4	±160
	J5	±90
	J6	±200
最大速度	J1	180
	J2	90
	J3	135
	J4	180
	J5	180
	J6	210
最大合成速度	mm/s	約 2200

位置繰り返し精度	mm	±0.02
本体質量	kg	約19
設置姿勢		床置き、天吊り

*1) 最大可搬質量は手首フランジ面下向姿勢 ($\pm 10^\circ$) での最大搭載質量。

(2.2.2.2) コントローラ

[Mitsubishi e]によると、コントローラは、内部に記憶したプログラムを選択し、実行することができる。ただし、コントローラ単体では、ポイントの設定、およびプログラムの入力は行えない。ロボットが2点間を移動する際に姿勢によっては速度を抑えなければならないような姿勢が発生する場合がある。このような場合、コントローラの最適速度制御機能を使用すると、軌跡の途中での速度を抑え、極力速度過大のエラーが出なくなる。また、ハンド質量、ワークなどの負荷により、ロボットが動き出すときや止まるときの加減速時間は変更する必要があるが、コントローラの最適加減速制御機能を用い、ハンドの質量や重心、ワークの有無を設定すると、最適な加減速時間を自動的に設定して動作する。

コントローラにはパラレル入出力ポートがあり、これを用いて外部機器からの制御、および外部機器の制御が可能である。コントローラとPC等の接続には、RS-232CまたはEthernetを使用する。これらの入出力機能、接続機能により、上位PCやシーケンサとのリンク、各種センサとの接続が可能である。

また、[Mitsubishi e]によると、Ethernetインターフェースを使用することで、リアルタイム外部制御機能が使用できる。これはロボットモーション制御周期単位で、位置指令データを取り込み、動作する機能である。

(2.2.2.3) ティーチングボックス

[Mitsubishi c]によると、ティーチングボックスをコントローラに接続することにより、以下の操作を行える。

- ① ジョグ送り（手動操作）
- ② ポイントデータ登録
- ③ プログラムの作成・確認
- ④ 入出力信号・変数のモニタ
- ⑤ メンテナンス

ポイントの直接設定は、2種類の方法がある。1つはJ1～J6の各軸の値により位置を決める方法である（関節型変数）。もう1つは、3次元空間におけるXYZ座標により位置を決める方法である（直交型変数）。

[Mitsubishi d]によると、ポイント間の移動方法は、3種類の方法がある。1つは各軸のモータを単

一方向に駆動し指定位置に移動する方法である（関節補間）。2つ目は現在位置と指定位置の間を直線で移動する方法である（直線補間）。3つ目は始点、通過点、終点を指定し、この3点で構成される円弧上を移動する方法である（円弧補間）。これらの移動方法は、プログラムのコマンドで区別される。

(2. 3) モバイルロボット用小型高性能アーム KATANA

(2. 3. 1) 特徴

Neuronics AG 製小型高性能アーム KATANA は、電子技術を一体化した、プログラムによる制御が可能な高性能ロボット用アームである。

(2. 3. 2) 構成

KATANA は以下のユニットにより構成される。

- ① アームユニット
- ② 電源・コントローラユニット
- ③ 電源アダプタ

(2. 3. 2. 1) アームユニット

[Revast d] によると、アームユニットは、ベース、2つのアーム（アップアーム、フォアアーム）、4つの関節と5つのモータ、グリッパからなる。表 2 にアームユニットの主な仕様を示す [Neuronics a]。

表 2 アームユニット仕様

項目	単位	仕様
動作自由度		4 軸
駆動方式		DC プラシモータ
最大ペイロード	g	約 500
ベース高	mm	約 130
アーム長	mm	約 210 + 180
旋回半径	mm	約 400
N 動作範囲	ベース回転	約±175
	肩上下	約 180 (-20 ~ +160)

	肘		約 240
	手首		約±175
分解能（アーム先端）	mm		0.5
材質			アルミニウム
本体質量	kg		約 3

リアルタイム位置制御機能や DC モータのモータドライバおよび配線は、アームユニット内に内蔵されている。

[Neuronics a]によると、フォアアームの先端には、赤外線センサを 9 個、圧力センサを 4 個備えた二本指グリッパがついている。グリッパの指は約 120°まで開閉可能、長さ約 160mm である。赤外線センサは、物体認識などに用いる。指の外側にも赤外線センサがついているので、物体をつかんだ状態での障害物の感知も可能である。グリッパ内には、センサ分析用の独立したマイクロコントローラを内蔵しているため、アームの動作に影響せずに、センサ情報を取得することが可能である。指の開閉は、フォアアーム内の 5 番目のモータを使って行う。

[Neuronics a]によると、電源・コントロールユニットとアームユニット間はシリアルインターフェースで接続され、非同期通信である。必要な接続は、TX と RX の 2 データライン、及び GND で、通信のバイト内のフォーマットは、スタートビット 1、データビット 8、トップビット 1 または 2、ボーレート 57600bps である。ホスト側には、PC の COM ポートがあればよい。いくつかのホストは CTS、DSR のハードウェアプロトコルを必要とするものもあるが、これらは RTS、DTR からループバックされている。

(2. 3. 2. 2) 電源・コントロールユニット

電源・コントロールユニットは、アームユニットへの +12V 電源供給及びアームユニットの制御を行う。キーボード、マウス、ディスプレイをつなぎ、Linux での制御ソフト開発も行える。

(2. 3. 2. 3) 電源アダプタ

電源アダプタは、AC100V を +24V にし、電源・コントロールユニットに供給する。

(2. 4) インテリジェントモバイルロボット Pioneer 2-DXe / -AT

(2. 4. 1) 特徴

[Revast b]によると、ActivMedia Robotics 製インテリジェントモバイルロボット Pioneer 2-DXe / -AT は、有用性と多様性をもつモバイルロボットシステムである。

Pioneer 2 シリーズのロボットはすべて大きな車輪を採用して最低地上高を高く取り、つまりせずに移動することができる。また、AT モデルは屋外での使用も可能である。ロボット上部の

天板を車軸についていた鉄板が下からさらに支えているので、Pioneer 2 は積載量が多く、ロボット内部にもさらに多くのパーツをつむことができる。Pioneer 2 の最新式 Siemens C166 ベースマイクロコントローラは以前のボードの処理速度を遥かに凌いでおり、またオプションのいろいろな入出力機器をつければ、幅広い実験が行える。Pioneer 2-DXe は優れたインテリジェントモバイルロボットシステムで、PC104+ 拡張 PCI バスと PC104 並列アクセスリカード用のオプション機器がついている。この PC104+ 拡張 PCI バスを使用し、イーサネットを通してレーザー機器が使用できる。

Pioneer 2 には SRI 人工知能センターのフル装備開発環境ソフトウェア "Saphira" が付属している。Saphira は PSOS と上位互換性があり、過去の資産を有効に活用することができる。また、新開発環境マルチエージェント "Ayllu" を使用して、Pioneer 2 と Pioneer 1 を同時に制御することも可能となった。Pioneer 2-DXe、Pioneer 2-AT は、レーザー機器・PTZ Camera・Fast-Track Vision・gripper・コンパスなどの本体一体型機器やソフトウェアを共用可能である。

各モデルにはロボット用開発環境クライアントアプリケーションが同梱されており、Microsoft Windows95/98/NT、Linux、Solaris・BSD・SunOS・IRIX などの UNIX ソフトウェアを含む各種 OS 上で動作させることができ、また Saphira、Ayllu、PAI、PSOS などの Pioneer モデル上でも動作する。表 3 に Pioneer 2 の主な仕様を示す ([ActivMedia e])。

表 3 Pioneer 2 仕様

項目	単位	Pioneer 2-DXe	Pioneer 2-AT
外形寸法	mm	400 (W) × 445(D) × 245(H)	490(w) × 500(D) × 24(H)
質量	kg	9	14
最大積載量	kg	23	30
最低地上高	mm	65	55
車輪径	mm	191	220
最大速度	m/s	1.8	0.7
最大購買	%	25	40
最大段差	mm	20	89
バッテリ稼働時間 (含オンボード PC)	hrs	8~10	4~6
	hrs	3~4	2~3

(2. 4. 1. 1) Pioneer 2-DXe

[ActivMedia b] によると、Pioneer 2-DXe は 252Wh のバッテリを搭載しており、満充電では 8~10 時間稼動できる。Pioneer 2-DXe の前面には 8 個のソナーを配列したソナーリングが装備しており、

オプションで背面にもソナーリングを装備することができる。

強力なモータと大きな車輪によって、最大移動速度は 1.8m/s であり、最大 23kg まで積載可能である。この高速での位置推測データを維持するために、どの Pioneer モデルも分解能 500 のエンコーダを使用している。ただし、最大積載時には最大移動速度を出すことはできない。

(2. 4. 1. 2) Pioneer 2-AT

[ActivMedia c] によると、Pioneer 2-AT は 4 輪駆動の屋外使用のロボットに必要な動力を備えており、安定した動作が可能である。最大移動速度は 0.7m/s、最大積載質量は 40kg である。Pioneer 2-AT は 252Wh のバッテリを搭載しており、満充電では 4~6 時間稼動できる。

(2. 5) TALKING PEOPLEBOT

(2. 5. 1) 特徴

[Revast c] によると、ActivMedia Robotics 製 TALKING PEOPLEBOT はクライアント/サーバ構造を採用しており、専用の内蔵低出力コンピュータやワイヤレス無線モジュールまたは無線イーサネットを使って外部のデスクトップ PC やラップトップ PC から操作ができる。P2OS (Pioneer 2 Operating System) サーバオペレーティングシステムはロボットの Siemens C-166 マイクロコントローラに内蔵されている。P2OS サーバオペレーティングシステムは、ソナー・モータエンコーダ・その他の入出力機器の情報をパケットにしてクライアント PC へ送信する。ロボットは P2OS のクライアントからも操作ができ、そのソフトウェアを Motif または C/C++コンパイラを使った WIN32 環境でプログラム開発が行える。ActivMedia 社は、開発環境ソフトウェアとして、ロボットの進行速度や方向、その他多くのロボットの行動を処理するライブラリを用意している。

PEOPLEBOT には、ロボット工学の入門者が経験豊かなロボット工学の専門家のように扱えるように、C や C++ のプログラムに透過的なロボットの行動のテンプレートが用意されているので、C/C++ の経験者であればプログラム作成が可能である。

PEOPLEBOT には直径 19.1cm の車輪が 2 個取り付けられており、ギア比 38.3 : 1 のモータによって 13kg の最大積載量がある。差動駆動方式によって、両輪を回転させながら移動しないで同じ場所で回転することや、片方の車輪だけを回転させながら半径 32cm の円を描くように回転することも可能である。PEOPLEBOT は 11% の勾配を上り、1.5cm の段差を乗り越えることができ、平地での最大移動速度は 0.8m/s である。

PEOPLEBOT のノーズ部分は、簡単に取り外してオンボードコンピュータを開けることができ、3 枚までのボードを取り付けることができる。どの PEOPLEBOT モデルにも Siemens C166 ベースマイクロコントローラが組み込まれている。

PEOPLEBOT は、自律走行をさせて障害物を回避することもできる。これらの機能はあらかじめテンプレートとしてプログラムされており、ロボットのソナーマップやレーザーマップを離れた場所のディスプレイに表示させることができる。さらにロボットソフトウェア開発環境を使用し、ロボットのプログラムに手を加えれば、新規の行動パターンを作成することができる。

表 4 に TALKING PEOPLEBOT の主な仕様を示す ([ActivMedia e])。

表 4 TALKING PEOPLEBOT 仕様

項目	単位	仕様
外形寸法	mm	380 (W)×470(D)×1040(H)
質量	kg	19
最大積載量	kg	13
最低地上高	mm	35
車輪径	mm	191
最大速度	m/s	0.8
最大購買	%	11
最大段差	mm	15
バッテリ稼働時間	hrs	3~4

(2. 6) Pioneer 2 / PEOPLEBOT 共通の構造及びコンポーネント

(2. 6. 1) 特長

[ActivMedia a] によると、ActivMedia の P シリーズロボットは Pioneer、PeopleBot を含む、モバイルロボットのファミリであり、すべて標準のコア構造を持ったインテリジェントロボットである。

ActivMedia のロボットは、計測と誘導のための基本コンポーネントを全て持っているが、それらは全てオンボードマイクロコントローラとモバイルロボットサーバソフトウェアを通して管理される。

ActivMedia ロボットはオプションの拡張電源、I/O ポート、カスタムアタッチメントを持っている。これら (16 デバイスまでのアドレスつき I/O バス、RS-232C シリアルポート、デジタル I/O ポート、5 つの A/D ポート、PSU コントローラ、その他) は、ロボットサーバソフトウェアへの共通アプリケーションインターフェースを通じて簡単に操作できる。

オンボードコンピュータオプションとして、さらに RS-232C ポート、PCI バス、PC104 + アクセサリカードも利用できる。また、標準でイーサネットを装備しているので、複数のロボットを制御することも可能である。

(2. 6. 2) クライアント-サーバ通信オプション

[ActivMedia a] によると、クライアント-サーバシリアル通信は、いくつかの形態をとることが出来る。

- ① PC に繋がれたロボット
- ② 無線モデムを通して PC と無線通信するロボット
- ③ 繋いだラップトップ PC を乗せたロボット
- ④ 組み込みオンボードコンピュータを搭載したロボット

(2.6.3) 動作モード

[ActivMedia a] によると、ActivMedia ロボットは、4つの動作モードを持っている。

- ① スタンドアロンモード
- ② サーバモード
- ③ ジョイスティック動作
- ④ セルフテストモード

(2.6.3.1) スタンドアロンモード

ロボットコントローラは、マイクロプロセッサ内に 32kB の Flash ROM と外付けの 32kB DRAM を持っている。サーバ側の動作を設計し、ポートアップを利用できるプログラマのみ、このモードを利用できる。

ロボット動作のマイクロコントローラレベルの実験のために、Pioneer 2 のダイレクト操作、スタンドアロン操作を Flash ROM と DRAM に再プログラミングできる。しかし、ダウンロードユーティリティは提供されているが、マイクロコントローラのプログラミングソフトウェアは提供されていない。ダウンロードユーティリティはロボットの OS のアップデートとアップグレードのために Flash ROM と RAM を再プログラムするためにのみ提供されている。

(2.6.3.2) サーバモード

通常のプログラマは、クライアントサイドの C/C++ のプログラミングによりロボットを動作させる。この場合、オンボード PC か通常の PC で動く ARIA や Saphira などのクライアントソフトウェアと連携して、P2OS によりクライアント-サーバ技術とロボット制御技術を利用できる。

通常はクライアント PC からサーバモードの Pioneer を動かすべきである。なぜならば、見慣れた PC のソフトウェアでプログラミングし、ロボットの機能を素早く、簡単なアクセスで確かめることができるからである。

(2.6.3.3) ジョイスティック操作とセルフテストモード

最後に、接続したジョイスティックからロボットを動かすオンボードソフトウェアが用意されている。また、ロボットのマイクロコントローラのハードウェアとソフトウェアを動かす、いくつかのセルフテストプログラムが提供されている。

(2. 6. 4) マルチロボットとイーサネット操作

[ActivMedia a] によると、サーバモードで動いているオンボード PC を搭載したロボットは、リモート PC からイーサネットを通じて X-Windows terminal(Linux) または WIN terminal エミュレーションソフトウェアのようなクライアントから動作させることができる。イーサネットはロボットと LAN hub の間を有線または無線で接続する事ができる。これにより、1 台のリモート PC から複数のロボットを動作させることが可能である。

イーサネットクロスケーブルでは、有線で peer-to-peer 接続することができる。

5 - 1 - 2 - 3 課題ア-2 に関する研究開発実施内容のまとめ

本年度は、次年度以降の研究開発内容の中心となる、複数のビデオカメラなどを用いて超高精細・広視野角の映像を取得する技術について関連公知技術をサーベイすることを目的に、主に現在世界的に注目されている Omni-directional Vision (全方位映像) に関する論文や関連製品についての調査を行った。

また、複数のビデオカメラによって撮影された映像の変換処理を行うことで 1 枚の超高精細・広視野角映像を取得する技術の開発に必要となる、ビデオカメラを中心とした実験開発機器の選定、ならびに、移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続する技術の開発に必要となる、カメラ、ロボット等の実験開発機器の選定を上記報告のとおり行った。さらにその報告内容に基づき、これら機器設備の調達を実施した。

5 - 1 - 3 ア-3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

本研究では、IPD 用映像制作時に必要となる、特殊レンズを用いた撮影映像やマルチカメラを用いた撮影映像の入力処理、非平面スクリーンへの投影を可能にする特殊映像フォーマットやマルチプロジェクタを考慮した映像出力処理、およびこれら様々な入力画像形式や映像出力形式に柔軟に対応可能な映像編集処理に関する技術を開発する。具体的には以下の 2 つのテーマについて研究を行う。

- ① 映像編集情報管理方式
- ② カメラワーク管理方式

5 - 1 - 3 - 1 本年度の研究開発目標

(1) テーマ①に関する既存技術の調査

映像制作・編集過程における IPD 固有の処理技術の開発のため、スクリーン形状やプロジェクタ構成の違いに対応する IPD 固有の映像編集処理と、それらに関する諸課題を列挙し、その課題解決に必要となる既存技術の調査を行う。

(2) テーマ②の研究開発に必要となる基本技術の調査

撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）の扱い方や、ビジョンベースによるカメラ位置の制御方法に関する共通基盤技術の準備のため、コンピュータビジョン（3 次元画像認識技術）に関する基礎技術をサーベイする。

5 - 1 - 3 - 2 実施内容

(1) IPD 用映像制作に関する技術の動向

(1. 1) はじめに

視覚的臨場感を決定する要素の一つに視野角がある [廣瀬 1994]。これが 20° を超えると臨場感は次第に上昇し、約 $80^\circ \sim 100^\circ$ に達すると満足できる程度になると言われている [畠田 1981]。このような原理に基づき、超大型スクリーンやマルチ（多面）スクリーン、柱面スクリーンやドーム型球面スクリーンといった特殊表示環境に対して、高精細・広視野角の映像を投影し、よりリアルで豊かな臨場感を持った映像空間を提供しようとする高臨場感ディスプレイ（IPD : Immersive

Projection Display) が注目されている。

一方、デジタル映像処理技術の発達により、映像制作・編集環境にめざましい進展がみられてきた。CG(Computer Graphics)による仮想映像の生成、SFX(Special Effects)による撮影不能な迫力ある特殊効果の付与、ノンリニア編集の導入による編集作業の効率化等、数多くの新しい技術によって、多様化・高度化・増大化する映像表現ニーズに応えられるようになってきた。しかし、これら技術の開発やその運用は主に、テレビ・ビデオおよび映画の分野で展開されている [Ohanian 1996]。デジタル映像制作に関わる優れたソフトウェアやシステムが数多く出現し普及してきたが、その大多数がビデオ映像あるいは映画用フィルム映像の制作を前提としている。このため、IPD における特殊な映像をそれらのシステムで制作しようとすると多くの困難に直面する。

本節では、弊社が開発した IPD 映像表示環境を対象に、そのスクリーン形状やプロジェクタ構成の違いに起因するコンテンツ制作時の問題点を示すとともに、その解決を図るために既存技術の報告を行う。

(1. 2) IPD 映像表示環境

弊社が開発した IPD 映像表示環境（プロジェクタアレイシステム）は複数のプロジェクタをアレイ状に並べ、分割した映像をそれぞれのプロジェクタから投影し、これをシームレスにつなぎ合わせることで高精細・広視野角の映像を表示するものである(図 1) [山崎 1999][Takeda 1999][yamasaki 2002]。プロジェクタの配置を変えることにより様々なスクリーン形状に対応することが可能である。

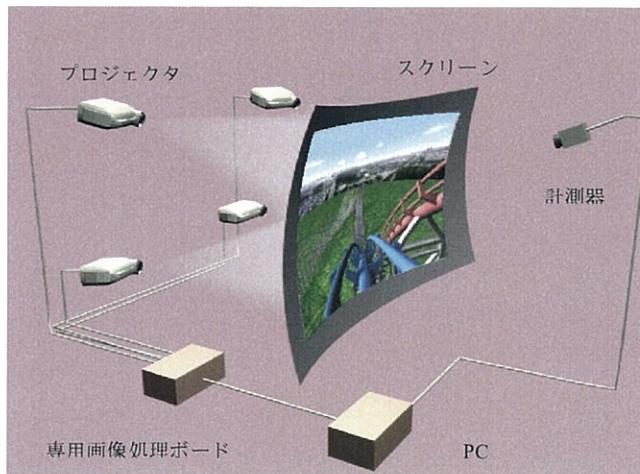


図 1 プロジェクタアレイシステム

IPD 表示環境において違和感の無いリアルな映像を表現するためには、図 2 に示すように、映像撮影時のカメラ位置と被写体の関係が観察者の理想視点位置とスクリーン上の表示位置との関係に一致するように撮影・投影し、現実世界と表示映像間の幾何学的な整合性を保障する必要がある。プロジェクタアレイシステムでは、各プロジェクタに理想視点から見た投影映像を供給することに

より、上記の原理に基づく映像を表示することができるよう、専用の画像処理ボードが各 PC に装着されている。この専用画像処理ボードでは、各プロジェクタの設置位置の誤差、プロジェクタの個体差などの影響を吸収するためにリアルタイムの幾何変換・色調変換が行われる。なお、専用画像処理ボードで行われる幾何変換・色調変換を決めるために、IPD 表示環境内で事前にキャリブレーションを行う。

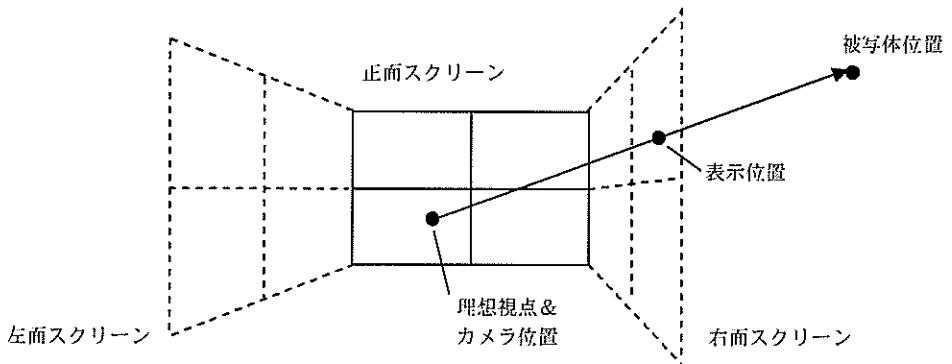


図 2 表示環境と表示映像の理想的な幾何学的関係

(1. 3) 入力画像撮影・制作段階での問題点

上記原理に基づいた映像を広視野角を特徴とする IPD 映像表示環境用に制作するためには、極めて広い視野角を持った映像を撮影または制作しなければならない。

このような映像を実写として撮影した例として、70mm 15 パーフォレーションのフィルムを用いたり、魚眼レンズを用いるものが [Lants 2001] において紹介されている。魚眼レンズに代表される全方位視覚センサとしては、カメラを回転させることによってパノラマ画像を作成するものや、複数台の固定カメラを放射状に設置するものなどがある [八木 2001 c]。

このうち、カメラを回転させてパノラマ画像を作成する方法は、画像の分解能がカメラの回転分解能として考えることができる利点があり、方位分解能に優れた全方位画像が得られる。しかし、一般にカメラの回転動作には、時間を要するため、リアルタイムのパノラマ撮影が難しい。

複数台の固定カメラを放射状に設置する方法は、リアルタイムのパノラマ撮影が可能である。この方法には、4 角錐ミラー や 6 角錐ミラー を用いることでカメラの光学中心を 1 点で交わるようにしたタイプのものもあり、その場合には全ての画像を同じ座標系（球面座標系）で表現できるという利点を持つ。しかし、カメラの光学中心が 1 点で交わるように、全てのカメラ間のアライメントとキャリブレーションを正確に行う必要がある。さらに複数のカメラの映像信号を同時に取り込むためには、カメラ台数分の画像入力用 A/D コンバータが必要となり、システム規模が大きくなる。

複数の固定カメラを放射状に設置した商業ベースの撮影システムとしては、日本シネセル株式会社の 35mm 9 面マルチ映像システムがある [Cinesell]。これは直径約 1 m の柱状のフレームに 9 台の 35mm フィルムカメラを固定したものである。35mm フィルムカメラに機械駆動式のものを採用し、单一モータの回転を、ゴムベルトを利用することにより各カメラに伝えてカメラ間の同期を取っている。このシステムではフィルムでの撮影となるため、ディジタルコンテンツ制作には、フィルムスキャナなどを用いた映像のデジタル化作業を必要とする。

上記のような撮影システムを使用して、商業ベースに乗るコンテンツを制作しようすると、以下のような実際的な問題が生じる。

- ① コストや機材調達、撮影条件等の問題により、表示システムに完全に合致する視野角を持った映像が撮れるとは限らない。
- ② 一般に映像撮影・制作スタッフは、テレビや映画等の一般的な平面映像を日常業務の対象にしていることが多く、映像の構図や演出を考える上では、レンズや射影形式の特殊性による撮影時の制約がなるべく少ない方が望ましい。
- ③ 撮影直後に IPD 表示環境で撮影した映像の確認を行うことが難しい。透視投影の撮影においても、映画制作などフィルムを用いた撮影では、現像作業が必要なため、撮影直後の映像確認は不可能であるが、ハイビジョンカメラによるデジタル撮影では可能とである。(2)の問題もあり、撮影直後に表示環境下での映像確認作業ができれば、撮影時の不具合を現場で修正することができ、その後の編集作業の効率化が図れる。

また、CG によって制作する場合には、4000 ピクセルを超える高解像度画像を作成しようとした場合、膨大な処理時間を要する。そのため CG 作成の方法としては、1 枚の高解像度の画像を作成し、これを IPD 表示環境のスクリーン形状やプロジェクタ構成を考慮して射影変換し、各プロジェクタ用の画像を作成する方法と、最初からスクリーン形状やプロジェクタ構成を考慮した設定を行い、各プロジェクタ用に分割された複数の画像を作成する方法と考えられる。

前者の方法を採用した場合の問題点として以下のものが挙げられる。

- ① 一般の CG ソフトウェアで対応可能なものは基本的に透視投影であり、一部のソフトのみが魚眼や柱面マッピングをサポートしている状況である。
- ② 制作者も透視投影での作業が多いため、魚眼や柱面マッピングによる設定に慣れなことが多い。また、CG 内のオブジェクトの動き付けを行う場合、制作者は何度も画像を出力させ、これを確認しながら作業を進める。しかし、魚眼や柱面マッピングなどの特殊な表現方法では、オブジェクトの動きが分りづらく、最終的なスクリーンイメージを想定することは非常に困難である。

IPD 用の CG 映像作成におけるオブジェクトの動き付け作業は、理想的には IPD のスクリーンに表示しながら行われることが望ましい。しかし、これを実現するためには、CG ソフトウェアと IPD

映像表示環境との連携を密にし、作成された CG がすぐにスクリーンに表示されるようにする必要がある。また、このような CG ソフトウェアが存在したとしても実際には、CG 作成作業とスクリーンの施設とが並行して行われている場合や、CG 作成作業を外部の業者に任せている場合など、現実的に実現不可能な状況が予想される。[Lants 2001]において、半球ドーム型スクリーンの IPD 表示環境におけるオブジェクトの動き付けに際して、ドームスクリーンを極座標および柱面座標で表現し、動き付けを行う方法が示されている。

一方、後者の方法では各プロジェクタで表示される映像のみが作成されるため、作成時間が大幅に削減できるという利点がある。しかし、この方法では分割して作成した画像間の整合性の問題が生じる場合を考えられる。

CG ソフトウェア上でカメラに関するパラメータを正しく指定していれば、原理的には隣り合う画像は適当な射影変換により接続可能である。しかしながら実際には CG ソフトウェアの特性により、これが保証されない場合がある。考えられる現象の例としては以下のものが挙げられる [守屋 1999]。

- ① テクスチャの連続性
- ② 影の連続性
- ③ パーティクルの連続性
- ④ 発光効果（グロー等）の連続性

我々がある CG ソフトウェアで実験した結果、①、②については条件を変えても全て整合性は保たれたが③については整合性が保たれる場合とそうでない場合があった。④については整合性が保証されなかった。図 3 に示すように、映像の接続部において発光体の不連続性が見られる。

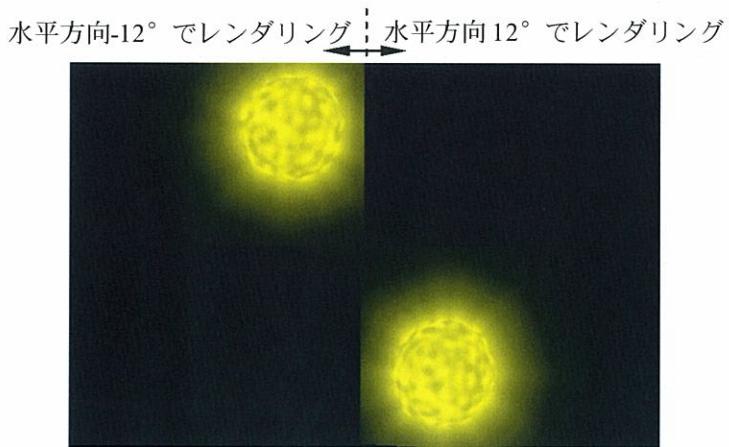


図 3 分散レンダリングで作成した画像を幾何変換後接続した例 [守屋 1999]

(1. 4) 編集段階での問題点

(1. 4. 1) 射影変換処理

最終的にプロジェクタに表示する映像は前述のとおり理想視点から見た投影映像である。この射影変換を考える際には、映像の各点を単位球面に射影したときの3次元位置として表現するのが計算上都合がよい。すなわち、焦点距離 f の透視投影としてある画像が与えられたときに、画像上の位置 $(x \ y)$ に対応する球面射影位置は $\mathbf{m} = (m_x \ m_y \ m_z)^t$ の形の3次元ベクトルで表現され

$$\mathbf{m} = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad (1)$$

となる。映像制作・編集における内部処理では、この \mathbf{m} を用い、映像データをスクリーンの位置と時刻に関する関数 $F = F(\mathbf{m}, t)$ として扱うことができる。

説明を簡単にするため、時刻に関するパラメータ t を一定にし、ある瞬間のフレーム映像を考える。プロジェクタへの入力映像を $P(x)$ とする。ここで $x = (x_x \ x_y \ n)^t$ であり、 $x_x \ x_y$ は映像上の位置、 n はプロジェクタの番号である。スクリーン上の点を前述の \mathbf{m} であらわす。プロジェクタの理想配置が決まると x と \mathbf{m} との関係

$$\mathbf{m} = g(x) \quad (2)$$

が定まる。一方、本編集システムへのある入力映像を $I(u)$ とする。ここで $u = (u_x \ u_y \ k)^t$ である。 k は入力映像を特定する番号である。入力映像の射影モデルおよびカメラパラメータから、 u と \mathbf{m} との関係

$$\mathbf{m} = h(u) \quad (3)$$

が定まる。

式(2) と式(3) より出力映像と入力映像の関係は

$$P(x) = I(h^{-1}(g(x))) \quad (4)$$

により求まる [守屋 1999]。

式(4) からわかるように、本変換では最終的に出力画像のパラメータ x についての関数により、すべての出力データを記述できる。すなわちこれは、内部的な処理過程で映像を2次元データとして定義する必要がないことを示している。本変換に限らず、編集システムで行う内部処理操作をす

べて x あるいは m についての連続的な関数で表現できれば、その過程における情報の欠落、すなわち画像の劣化は起こらない。しかしながら一般にこれは非常に難しく、できるだけ画像劣化が起こらないよう配慮してシステム設計を行う必要がある。

(1.4.2) その他の処理

まず、入力画像として特殊な全方位レンズや魚眼レンズを使用して実写を撮影する場合や魚眼や柱面マッピングによるレンダリングで CG 制作を行い、1枚の広視野角・高解像度の画像を作成したと仮定し、この画像に対して編集を加えたのち、各プロジェクト用の映像を射影変換により求めることを考える。

このような画像が与えられたとき、これを編集しようとした段階で、さらにいくつかの問題に直面する。

一般的のノンリニア編集システムは、テレビ・ビデオおよび映画の分野で発展してきたものであるため、そこで用意されている編集機能は透視投影映像を仮定したものとなっている場合が多い。このため、全方位センサを用いて撮影した映像などに対して直接適用することができない機能が存在する [守屋 1999]。

[1] エフェクト機能

ワイプ、カーテン等のエフェクトを画像全体に付加する処理は、挿入する相手側の画像を透視投影画像と仮定して処理を行っており、この条件に合わない画像に対して、エフェクトを行った場合、IPD 表示環境のスクリーン上では期待するエフェクト効果が得られない。

[2] タイトル・テロップ挿入機能

コンテンツタイトルやテロップを画像上に挿入する機能においても、挿入する相手側の画像を透視投影画像と仮定されており、この条件に合わない画像に対して文字を挿入してしまうと、IPD 表示環境のスクリーンに投影した際に文字が歪んで見える。

[3] 合成機能

実写あるいは CG 映像のある領域をマスク情報を使って切り出し、別の映像に合成する機能は多くの映像制作において利用される。一般に合成される映像と合成する映像のカメラパラメータを一致させることで、幾何学的に違和感の無い合成が実現される。一般的な編集システムにおいては、透視投影画像の編集を前提に設計されているため、合成される映像と合成する映像の座標形式が異なる場合には使用することができない。例えば、魚眼レンズを使用して撮影した実写映像と、この実写撮影に用いた魚眼レンズに相当するパラメータを与えて作成した CG とを合成する場合には、そのまま合成することで違和感の無い合成映像を作成することができるが、魚眼レンズを用いて撮影した映像に、柱面座標にマッピングされた画像など異なる座標形式にマッピングされた画像を合成する場合には、両者の座標系を統一するなどの工夫が必要である。

また一般に、実写で撮影された映像には、撮影時の誤差の混入などにより、厳密な意味でのカメ

ラパラメータの一致は困難であり、合成処理時の微調整は不可欠である。その代表的な例がスタビライズである。一般的な撮影映像では、撮影時のカメラの微妙な揺れが混入していることがあり、この場合、直接撮影画像にオブジェクトを合成してしまうと、これが不要に振動して見えてしまう現象が発生する。このため、あらかじめ画像の揺れを検出し、画像の揺れを補正する処理を行っておく必要がある。透視投影画像の編集を前提とした合成システムでは、これを2次元補正により解決しているが、様々な座標形式の画像を取り扱うIPD用の映像編集においては、2次元補正ではスタビライズを行えない場合がある。

また、スタビライズを行うためには、カメラの動きを検出するために画像上の特徴的な領域の動きを検出するモーショントラッキングを行うことが一般的である。正確なモーショントラッキングを行うためには、1フレームずつ特徴領域の対応を取ることが望ましいが、限られた編集時間を効率的に使うため、数フレームおきに特徴領域の探索を行い、中間のフレームは2次元の線形補間で求めることが良く行われる。透視投影画像においては、この方法によってほぼ正しい結果が得られることが多いが、透視投影以外の画像を取り扱う場合には、この方法は使用できない。

[4] モーフィング機能

合成機能で述べたモーショントラッキングの2次元線形補間と同じ問題がモーフィング機能においても起きる。モーフィングとは、ある形状から別の形状へ徐々に変化する中間画像を生成する画像処理である。2つの画像上の対応点を定義することにより、その対応点の中間位置を補間することで中間画像を作成する。この場合も対応点の補間を2次元の線形補間で求めることが良く行われるが、この方法は透視投影以外の画像を取り扱う場合には、使用できない [紅山 2001]。

これらの問題は、処理画像を透視画像と過程しているために生じるものであるため、画像および処理を単位球面上で行うことにより解決することが可能だと思われる。しかしながら、例えばワイプなどのエフェクトが、スクリーン上で歪まないように編集できたとしても、その効果が編集者の意図したものであるかどうかを確認する手段が、必要である。しかし、様々なスクリーン形状に対応できる確認手段とはどのようなものであるか、今後検討していく必要がある。

以上は、1枚の広視野角・高解像度の入力画像に対して編集を行うことを考えたが、各プロジェクトに与える映像が最終的に透視投影画像である場合には、この入力画像を各プロジェクト用に透視投影変換した後で編集を行うことも考えられる。この方法では、単体プロジェクト用の映像の取扱が非常に簡単になるが、プロジェクト間にまたがるエフェクトや文字の移動などを行うことは難しい。また、スクリーン全体のイメージがつかみにくいといった問題もある。

(1. 5) その他の問題点

これまででは、表示映像に厳密な幾何学的正確性が求められることを前提に考えてきた。しかし、異なるスクリーン形状用に制作したコンテンツの再利用をする場合や厳密な幾何学的正確性を求めてしまうと、映像制作者が表現したかったメッセージが伝わらなくなってしまうといった弊害が生じる場合などには、幾何学的正確性を犠牲にしなければならない状況も考えられる。

これまでのコンテンツ制作において、我々も上記のような状況に直面し、以下のような方法で解決を図った [守屋 2001]。

- ① 撮影時のレンズパラメータを、実際のものとは異なるものと解釈する方法。
- ② 撮影時の射影モデルを、実際のものとは異なるものと解釈する方法。

①の方法は、例えば 180° の視野角を持つスクリーン用に 180° の視野角の魚眼レンズを用いて撮影を行った映像があるとする。これを 270° の視野角のスクリーンの表示環境に再利用しようとした場合、 180° で撮影した魚眼映像を 270° の魚眼映像であるとして射影変換を行うというものである。

②の方法は約 $90^\circ \times 40^\circ$ の水平・垂直視野角を持つ球面スクリーンのIPDに適応したものである。オリジナルの映像は透視投影形式で撮影したため、厳密に幾何学的正確性を追求してしまうと図 4 に示すグリッドの部分のみスクリーンに表示される。このため、映像の中央部分で人物の顔などコンテンツ上非常に重要な部分がスクリーンに映らない場面が多くなってしまった。そのため、撮影された映像を透視投影における射影面が本来の平面（図 5 a）ではなく、円柱面となる特殊な射影モデルに基づく（図 5 b）と仮定してスクリーンに表示することとした。

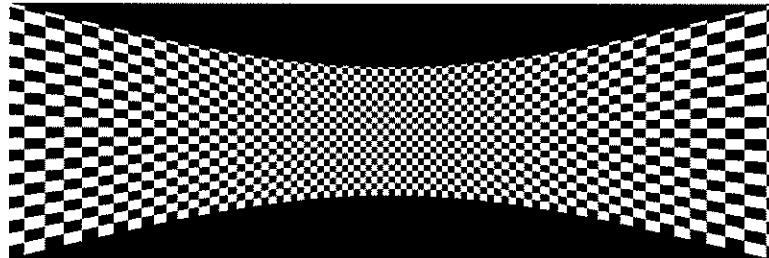


図 4 透視投影映像のスクリーン表示領域

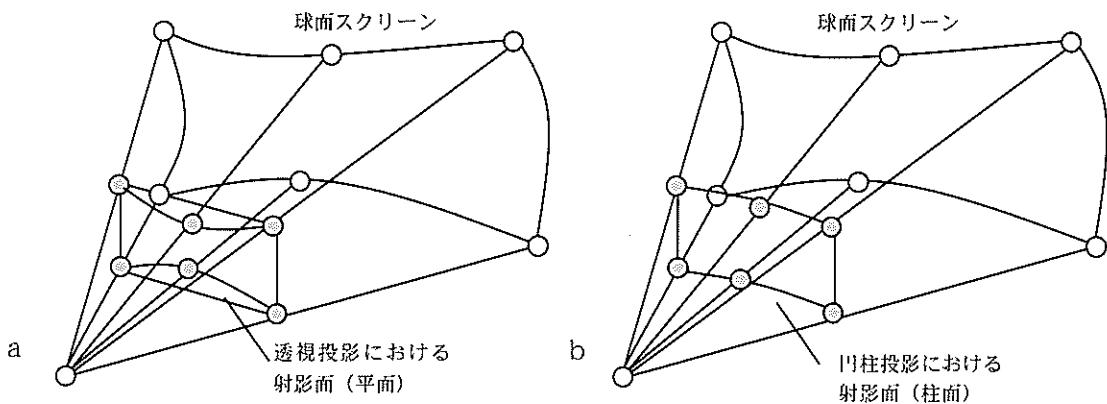


図 5 射影面の異なる解釈による球面スクリーンへの映像表示（a.平面、b.円柱面） [守屋 2001]

ただし、建物の柱などがクローズアップされる場面などでは、被写体に直線成分が多く、その歪みが顕著になるため本来の射影モデルを採用した。さらにこれら2つの方法の切り替えが目立たないように両者を時間と共に滑らかに変形することができるようとした。

(1. 6) おわりに

透視投影画像、魚眼画像、その他の広視野角映像など、IPD 映像表示環境においては、様々な画像を統一的に取り扱う必要がある。このため、映像制作・編集における内部処理では、これらを単位球面上に投影し、この単位球面上で処理を行うことが望ましいと考えられる。しかしながら、すべての画像処理を単位球面上で行うことは難しく、単位球面上で行うことのできる処理とできない処理とをどのように混在させるべきか、編集過程の映像をどのように表示し確認させるべきかなどについて、さらに検討をする必要がある。

(2) コンピュータビジョン基本技術サーベイ

(2. 1) はじめに

実写画像には、実世界における3次元幾何情報が、それを2次元空間に射影したものとして保持されている。テレビや映画などで表示する限りにおいては、一般にこれを2次元情報として扱うだけで十分であるが、本研究が対象とする IPD 映像表示環境においては、表示映像の3次元幾何学的な整合性が、違和感の無い臨場感あふれる映像を表示するために必要な要素となるため、観察者の位置、スクリーンの形状、プロジェクタの位置、表示する映像撮影時のカメラパラメータ、被写体の位置などの3次元情報の取り扱いが極めて重要となる。

コンピュータグラフィックス(CG)において用いられる幾何学処理は、3次元幾何学情報が与えられたときに、それを2次元情報に変換する過程であるため、被写体やカメラの3次元的な制約のもと、2次元映像を作成するアプローチと言うことができる。これに対し、本研究が対象とする内容では、どういう映像を表示すべきかといった映像に対する制約が加わるため、CG とは逆の方向、すなわち与えられた2次元画像の制約からその映像を射影する被写体やカメラの3次元的な幾何条件を求める、というアプローチについても合わせて考える必要が生じている。

このような考え方の基本となるのは、透視変換に基づく3次元空間と2次元画像の幾何学的対応問題である。コンピュータビジョンの分野では、この問題について特に詳細に扱っており、そこで用いられる3次元幾何学に関する基本技術は、幾何学的に厳密な整合性が求められる映像制作においても有用である。そこで本項ではそれらのなかで特に特徴点を用いた3次元推定技術の主要なものについてのサーベイを行う。

(2. 2) 前提条件

(2. 2. 1) 透視投影モデル

3次元空間に存在する被写体と撮影画像間の幾何学的な対応関係を示すカメラの投影モデルには

様々な形式が存在しているが、実際に使われるカメラや、CG 作成時の投影モデルとしては、これを透視投影モデルに基づくものと仮定として扱うのが一般的である。

透視投影モデルでは、図 1 に示すとおり、単一視点制約に基づき、視点と被写体を結ぶ直線と投影面（スクリーン）が交わる点に像が投影される。この関係を式で書くと

$$\alpha m = R(P - B) \quad (1)$$

となる。これをここでは透視投影基本式と呼ぶことにする。ここで B はカメラ位置（視点位置）をワールド座標系で表した 3 次元ベクトル、 R はカメラ方向を示す 3×3 の回転行列、 P は被写体（特徴点）位置をワールド座標系で表した 3 次元ベクトル、 α は視点位置から被写体までの距離をあらわすスカラー、 m は特徴点の画像上位置 (x, y) を、カメラ座標系による単位球面座標表現であらわしたもので、具体的には

$$m = \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}} \begin{pmatrix} x \\ y \\ f \end{pmatrix} \quad (2)$$

となる。ここで f は焦点距離である。

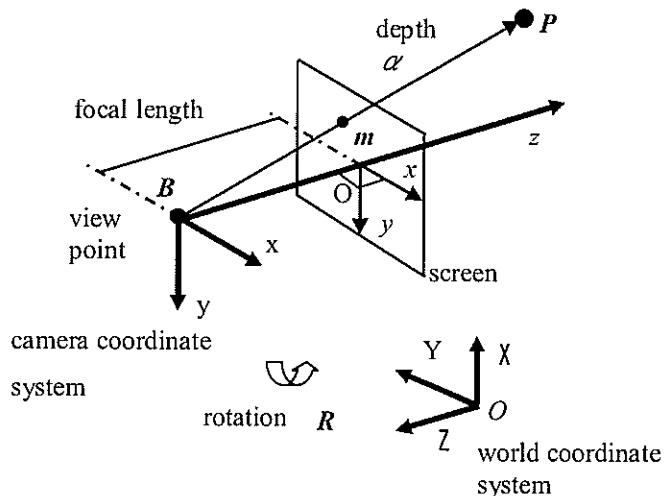


図 1 透視投影モデル

ただし、実際のカメラを考えると、レンズの光学的な特性やカメラそのものの個体差などにより、図 1 に示すような透視投影モデルに厳密な意味で必ずしも従うわけではなく、その際にはレンズの

歪みモデルの利用が必要となる。その具体的なものについていくつかのモデルが提案されているが [Wneg 1992]、本報告ではこの歪みについては考えないことにする。

(2. 2. 2) 問題定義

コンピュータビジョンにおける3次元画像認識問題としては様々なものが想定されるが、特徴点を用いたものについて、その基本的な考え方は次のようにになる。すなわち、複数の特徴点や複数カメラ画像から得られるそれぞれの透視投影基本式を連立することで未知パラメータを求める、ということである。

具体的には、まず前項の式(1)を次のように書き換える。

$$\alpha_i m_i = R^{(k)}(P_i - B^{(k)}) \quad (3)$$

ここで、 i ($i=1,2,\dots,I$) は特徴点番号、 k ($k=1,2,\dots,K$) は画像（カメラ）番号である。さまざまな i と k の組み合わせで得られる複数の式(3)を連立させて未知パラメータを計算するのが、特徴点を用いる3次元画像認識問題の基本的な考え方である。

(2. 3) 具体アルゴリズム

(2. 3. 1) アルゴリズムの多様性

特徴点を用いた3次元推定問題は、2.2.2に述べた考え方方が基本になっている。しかしながら、未知・既知パラメータとしてそれぞれ何を想定するか、各パラメータに拘束条件があるかなど、実際上の問題定義にはさまざまなケースが考えられ、それぞれについてより容易に、あるいは有効に解を求めるためのアルゴリズムが多々存在している。

具体的に言うと、入力画像の枚数（カメラの数）として1枚を想定するもの [Haralick 1991][Wolfe 1991][Moriya 2000 b]、2枚を想定するもの [Tsai 1984][Higgins 1981][Luong 1996][Faugeras 1990][Hartley 1995 a][Dhond 1989]、3枚を想定するもの [Shashua 1995]、N枚を想定するもの [Triggs 1996] などがある。観測パラメータとしては、特徴点の位置のみを利用するものから、これらを結んで得られる特徴線情報を用いるもの、あるいは特徴点の離散的な位置ではなくその連続的なオティカルフロー値を用いるもの [Adiv 1985] など、多くのものが考えられる。何を未知パラメータとし、何を既知パラメータとするかについても、カメラ内部パラメータを未知とするか既知とするか [Maybank 1992][Weng 1992]、複数カメラ間の相対運動を未知とするか既知とするか [Moriya 2000 b]、相対回転を未知とするか既知とするかなど、さまざまな組み合わせがある。特徴情報の条件についても、特徴点について例えばすべての特徴点が平面に存在する [Tsai 1982][Svenson 1987]、などの条件がある、あるいは、特徴線が3次元空間内で直交しているなどの条件がある [Caprile 1990]、など多くのケースが考えられる。また、解を求めるにあたって、観測パラメータ数が必要十分であ

る場合と、冗長である場合がある。計算方法について言うと、代数的手法によるもの [甘利 1987]、近似計算によるもの [DeMenthon 1992][Huang 1989]、繰り返し数値計算によるものなどがある。さらに求められる未知パラメータに関する要求性能としてもさまざまなものが考えられ、それが精度であったり、計算速度であったり、ある局所的な整合性であったり、時間的・空間的滑らかさであったり、目的や条件によって異なる。

以上述べたとおり、3 次元推定問題には、極めて多くの条件・目的が存在し [金谷 1990][金谷 1995][出口 1991][徐 1998][Faugeras 1993][Kanatani 1993][Kanatani 1996][Trucco 1998][Hartley 2000]、それらすべての組み合わせに有効に適用できる汎用的な手法はいまだ確立されるにいたっていない。その理由としては多くの要素が考えられるが、代表的なものとしては、透視投影モデルの非線形性や、透視投影基本式に含まれる回転行列の正規直交性という拘束である。すなわち、回転行列 R の自由度（実質的なパラメータ数）は 3 にも係わらず、これを 3 パラメータで表現することが必ずしも計算を簡単にするわけではなく、例えば以下に述べるような様々な表現方法がある。

① 9 パラメータ表現+6 拘束式

回転マトリクス R を以下のようにあらわしたとき

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (1)$$

正規直交性より、各パラメータは以下の拘束を満たす。

$$r_{11}^2 + r_{12}^2 + r_{13}^2 = 1 \quad (2)$$

$$\mathbf{I}_3^{11} + \mathbf{I}_3^{22} + \mathbf{I}_3^{33} = \mathbf{I} \quad (3)$$

$$r_{31}^2 + r_{32}^2 + r_{33}^2 = 1 \quad (4)$$

$$r_{11}r_{21} + r_{12}r_{22} + r_{13}r_{23} = 0 \quad (5)$$

$$r_{21}r_{31} + r_{22}r_{32} + r_{23}r_{33} = 0 \quad (6)$$

$$r_{31}r_{11} + r_{32}r_{12} + r_{33}r_{13} = 0 \quad (7)$$

② オイラー角表現

回転マトリクス R を θ 、 ϕ 、 ψ の 3 つの角度で、以下のようにあらわす。

$$R = \begin{pmatrix} \cos\theta\cos\phi\cos\varphi - \sin\phi\sin\varphi & -\cos\theta\cos\phi\sin\varphi - \sin\phi\cos\varphi & \sin\theta\cos\phi \\ \cos\theta\sin\phi\cos\varphi + \cos\phi\sin\varphi & -\cos\theta\sin\phi\sin\varphi + \cos\phi\cos\varphi & \sin\theta\sin\phi \\ -\sin\theta\cos\phi & \sin\theta\sin\phi & \cos\theta \end{pmatrix} \quad (8)$$

③ 4 元数+1 拘束式

回転マトリクス R を 4つのパラメータ q_0, q_1, q_2, q_3 で次のようにあらわす [Hom 1987]。

$$R = \begin{pmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & -2q_0q_3 + 2q_1q_2 & 2q_0q_2 + 2q_1q_3 \\ 2q_0q_3 + 2q_1q_2 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & -2q_0q_1 + 2q_2q_3 \\ -2q_0q_2 + 2q_1q_3 & 2q_0q_1 + 2q_2q_3 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

なおここで

$$q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \quad (10)$$

である。

これら 3 表現方法以外にも回転行列の表現形式も存在するが、そのどの表現形式を利用するのが有効かは、問題定義や目的によって異なっているが、いずれにせよ上に示すような各パラメータの持つ非線形性により、式(1) の連立方程式を作成したときに、未知パラメータを求めるための方程式の変形が、すぐに高次の方程式になってしまい、そこにそれぞれの問題固有の特徴を用いた何らかの工夫が必要となる。

(2.3.2) カメラ回転推定問題 1

前項で述べた回転行列 R の取り扱い方法の例として、カメラを回転させて撮影した 2 枚の画像が与えられたときに、必要十分な観測パラメータから、回転行列 R を求める問題を考える。問題は以下のように定義される。

いま、位置不動のカメラを回転させて撮影した 2 枚の画像が与えられたとき、そのカメラ回転 R を求める。なおここで、画像 1 の特徴点 m_1 が 画像 2 の m'_1 に、画像 1 の特徴点 m_2 が 画像 2 の直線 L'_2 上のどこかの位置に、それぞれ移るものとする。

解法の 1 例は次のようになる。

まず、直線 L'_2 を n'_2 と表現する。ここで n'_2 は、射影平面上の直線 L'_2 と視点が作る平面の法線ベクトルである。次に、画像 2において、 m'_1 を原点に、直線 L'_2 を x 軸に平行な直線 L''_2 に移す回転 R_2 を求める。この条件を満たす式は

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = R_2 m'_1 \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} 0 \\ c_2 \\ c_3 \end{pmatrix} = R_2 n'_2 \quad (2)$$

である (c_2, c_3 は任意)。いま、回転 R_2 を $R_2 = \begin{pmatrix} r'_1 \\ r'_2 \\ r'_3 \end{pmatrix}$ とおく。式(1)(2) と回転行列の正規直交性から、次の拘束式が得られる。

$$(r_1, m'_1) = 0, \quad (3)$$

$$(r_2, m'_1) = 0, \quad (4)$$

$$(r_3, m'_1) = 1, \quad (5)$$

$$(r_1, n'_2) = 0, \quad (6)$$

$$(r_1, r_2) = 0, \quad (7)$$

$$(r_2, r_3) = 0, \quad (8)$$

$$(r_3, r_1) = 0, \quad (9)$$

$$r_1^2 = 1, \quad (10)$$

$$r_2^2 = 1, \quad (11)$$

$$r_3^2 = 1 \quad (12)$$

式(5)(12) より $r_3 = m'$ がまず得られる。次に式(3)(6)(7)(9)(10)より $r_1 = \text{normalize}[n'_2 \times r_3] = \text{normalize}[n'_2 \times m'_2]$ が求まる。さらに式(7)(8)(11)より $r_2 = \text{normalize}[r_3 \times r_1] = \text{normalize}[m'_2 \times (n'_2 \times m'_2)]$ が求まり、以上より回転 R_2 が求まる。なおここで (\cdot, \cdot) は内積を、 $\cdot \times \cdot$ は外積を、 $\text{normalize}[\cdot]$ は正規化操作をそれぞれ示す。

次に画像 1において、 m_1 を原点に、 m_2 を L^n_2 上に移す回転 R_1 を求める。その具体的な方法は上と同様である。

最後に、合成回転 $R = R_2^{-1}R_1$ を計算する。これが本問題の解である。

(2. 3. 3) カメラ回転推定問題 2

次に、前項の問題において、観測パラメータとして解を求めるのに冗長な数のものが得られる場合について考える。問題は以下のように定義される。

いま、位置不動のカメラを回転させて撮影した 2 枚の画像が与えられたとき、そのカメラ回転 R を求める。なおここで、画像 1 の特徴点 m_i が 画像 2 の m'_i に対応するもの ($i = 1, 2, \dots, N$) とする。

解は次のようにして求められる。

まず、観測パラメータから以下の透視投影基本式が得られる。

$$m'_i = Rm_i \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

冗長拘束の最適化を行うための評価関数を定義する。

$$\sum_{i=1}^N (\mathbf{m}'_i - \mathbf{R}\mathbf{m}_i)^2 \leftarrow \min \quad (2)$$

これを展開すると、次のように書き換えられる。

$$\sum_{i=1}^N (\mathbf{m}'_i - \mathbf{R}\mathbf{m}_i)^2 = \sum_{i=1}^N (\mathbf{m}'_i^T - 2\mathbf{m}'_i^T \mathbf{R}\mathbf{m}_i + \mathbf{m}_i^T)^2 = 2N - 2\sum_{i=1}^N \mathbf{m}'_i^T \mathbf{R}\mathbf{m}_i \leftarrow \min \quad (3)$$

これを最小とするのは次を満たすときである。

$$\sum_{i=1}^N \mathbf{m}'_i^T \mathbf{R}\mathbf{m}_i \leftarrow \max \quad (4)$$

変形して

$$\sum_{i=1}^N \text{tr}[\mathbf{R}\mathbf{m}_i \mathbf{m}'_i] = \text{tr}\left[\mathbf{R} \sum_{i=1}^N \mathbf{m}_i \mathbf{m}'_i\right] = \text{tr}[\mathbf{RM}] \leftarrow \max \quad (5)$$

ここで $\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N \mathbf{m}_i \mathbf{m}'_i$ である。 \mathbf{M} を特異値分解して $\mathbf{M} = \mathbf{V} \Lambda \mathbf{U}' = \mathbf{V} \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \mathbf{U}'$, これを式(5)

に代入して $\text{tr}[\mathbf{R} \Lambda \mathbf{U}'] \leftarrow \max$ が得られるが、ここで公式 $\text{tr}[AB] = \text{tr}[BA]$ を利用して $\text{tr}[\mathbf{U}' \mathbf{R} \Lambda] \leftarrow \max$, $\mathbf{U}' \mathbf{R} \mathbf{V}$ は正規直交行列だから、(5) を最大にするのは、 $\mathbf{U}' \mathbf{R} \mathbf{V} = \mathbf{I}$ のときであり、 $\text{tr}[\mathbf{U}' \mathbf{R} \Lambda] = \text{tr}[\Lambda] = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$ となる。求める解は $\mathbf{R} = \mathbf{U} \mathbf{V}$ である。

(2. 3. 4) 透視 3 点問題

カメラ位置・姿勢を推定する問題のなかで最も基本的なものの一つである。1枚の画像のみから、未知のカメラ位置とカメラ方向を求めようとするもので、問題は以下のように定義される

いま、1枚の画像が与えられ、3次元位置既知の3点 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3$ がそれぞれ画像上に $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3$ と写る。このとき、カメラ位置 \mathbf{B} および方向 \mathbf{R} を求める。カメラ内部パラメータは既知とする。

解は次のようにして求められる。

まず、観測パラメータから以下の3つの透視投影基本式が得られる。

$$\alpha_1 \mathbf{m}_1 = \mathbf{R}(\mathbf{P}_1 - \mathbf{B}) \quad (1)$$

$$\alpha_2 \mathbf{m}_2 = \mathbf{R}(\mathbf{P}_2 - \mathbf{B}) \quad (2)$$

$$\alpha_3 \mathbf{m}_3 = \mathbf{R}(\mathbf{P}_3 - \mathbf{B}) \quad (3)$$

2式の両辺の差を取って B を消去する。

$$\alpha_1 m_1 - \alpha_2 m_2 = R(P_1 - P_2) \quad (4)$$

$$\alpha_2 m_2 - \alpha_3 m_3 = R(P_2 - P_3) \quad (5)$$

$$\alpha_3 m_3 - \alpha_1 m_1 = R(P_3 - P_1) \quad (6)$$

各式の両辺を二乗して

$$\alpha_1^2 - 2\alpha_1\alpha_2(m_1m_2) + \alpha_2^2 = (P_1 - P_2)^2 \quad (7)$$

$$\alpha_2^2 - 2\alpha_2\alpha_3(m_2m_3) + \alpha_3^2 = (P_2 - P_3)^2 \quad (8)$$

$$\alpha_3^2 - 2\alpha_3\alpha_1(m_3m_1) + \alpha_1^2 = (P_3 - P_1)^2 \quad (9)$$

ここで各係数を $D_A, D_B, D_C, E_A, E_B, E_C$ と表現すると

$$\alpha_1^2 - D_A\alpha_1\alpha_2 + \alpha_2^2 = E_A \quad (10)$$

$$\alpha_2^2 - D_B\alpha_2\alpha_3 + \alpha_3^2 = E_B \quad (11)$$

$$\alpha_3^2 - D_C\alpha_3\alpha_1 + \alpha_1^2 = E_C \quad (12)$$

が得られる。ここで $\frac{\alpha_2}{\alpha_1} = y, \frac{\alpha_3}{\alpha_1} = z$ とおき代入すると

$$\alpha_1^2 - D_A\alpha_1^2y + \alpha_1^2y^2 = E_A \quad (13)$$

$$\alpha_1^2y^2 - D_B\alpha_1^2yz + \alpha_1^2z^2 = E_B \quad (14)$$

$$\alpha_1^2z^2 - D_C\alpha_1^2z + \alpha_1^2 = E_C \quad (15)$$

となる。これらはすべて α_1^2 の関数となり、3式を連立させて y, z を消去すると次の4次方程式があらわされる。

$$(\alpha_1^2)^4 + c_3(\alpha_1^2)^3 + c_2(\alpha_1^2)^2 + c_1(\alpha_1^2) + c_0 = 0 \quad (16)$$

これを解いて、 α_1 が求まる。これを式(10)(11)に代入して α_2, α_3 が求まる。これらを式(4)(5)(6)に代入することで、 R が求まる。これと α_1 を式(1)に代入することで、 B が求まる [Haralick 1991][Wolfe 1991][Moriya 2000 b]。

(2. 3. 5) 2点問題

本問題は位置・方向未知の2つのカメラで、3次元空間に存在する位置未知の特徴点の画像が与

えられたとき、未知パラメータを求める問題で、そこで用いる特徴点数は算出に必要十分な 5 点である。問題は以下のとおり定義される。

いま、異なる位置、方向から撮影した 2 枚の画像が与えられ、5 個の特徴点の画像 m_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) および m'_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) が観測される。2 枚の画像間のカメラ相対位置 b 、相対回転 R を求めよう。

解は次のようにして求められる。まず、観測パラメータから以下の 5 つの透視投影基本式が得られる。

$$\alpha'_i m'_i = R(\alpha_i m_i - b) \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (1)$$

各式における α_i , α'_i をベクトル 3 重積の関係を用いて消去する。

$$(m'_i \times b, Rm_i) = |m'_i, b, Rm_i| = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, 5) \quad (2)$$

この式であらわされる 5 未知数 5 連立方程式を解くことになるが、これを代数的に直接求めることは極めて困難で、数値計算的手法の利用が不可欠と言われている。これを現実的な計算量で求める方法などが提案されている。

(2.3.6) 8 点問題

前述の 5 点問題が必要十分な特徴点から解を求めるのに対し、本問題では同じ未知パラメータを、冗長な数の特徴点（観測パラメータ）を用ることで計算を容易にする。問題は次のように定義される。

いま、異なる位置、方向から撮影した 2 枚の画像が与えられ、8 個以上の特徴点の画像 m_i ($i = 1, 2, \dots, N$) および m'_i ($i = 1, 2, \dots, N$) が観測される。2 枚の画像間のカメラ相対位置 b 、相対回転 R を求める。解は次のように求められる。

まず、観測パラメータから以下の N 個の透視投影基本式が得られる。

$$\alpha'_i m'_i = R(\alpha_i m_i - b) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

各式における α_i , α'_i をベクトル 3 重積の関係を用いて消去する。

$$(m'_i \times b, Rm_i) = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

ここで、外積 $m'_i \times b$ を以下のようにマトリクスの積で表現する。

$$m'_i \times b = m''_i B \quad (3)$$

なおここで $\mathbf{b} = \begin{pmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{pmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & -b_x & b_x \\ b_y & 0 & -b_y \\ -b_z & b_z & 0 \end{pmatrix}$ である。これにより式(3) は

$$\mathbf{m}_i'^T \mathbf{B} \mathbf{R} \mathbf{m}_i = 0 \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (4)$$

と表現することができる。 $\mathbf{B} \mathbf{R} = \mathbf{E}$ とおくと

$$\mathbf{m}_i'^T \mathbf{E} \mathbf{m}_i = 0 \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (5)$$

となる。この \mathbf{E} を Essential Matrix と呼ぶ。式 (5) で \mathbf{E} にはスケールに関する自由度があるから、

$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & 1 \end{pmatrix}$ とおくことができる。すべての点での式(5) を考えて、これを書き換えると

$$\begin{pmatrix} x_1'x_1 & x_1'y_1 & x_1'f & y_1'x_1 & y_1'y_1 & y_1'f & fx_1 & fy_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_N'x_N & x_N'y_N & x_N'f & y_N'x_N & y_N'y_N & y_N'f & fx_N & fy_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{12} \\ e_{13} \\ \vdots \\ e_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f^2 \\ \vdots \\ -f^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

が得られる。未知数 $\mathbf{e} = (e_{11} \ e_{12} \ e_{13} \dots e_{32})^T$ は 8 次元ベクトルだから、8 点以上の観測点があれば (6) 式よりこれを一意に求めることができる。

次に、 \mathbf{E} を \mathbf{b} と \mathbf{R} に分解する。もし、 \mathbf{E} に全く誤差が含まれないときに、 \mathbf{E} が回転行列 \mathbf{R} と \mathbf{b} の外積を示すマトリックス \mathbf{B} との積に分解できる必要十分条件は、 \mathbf{E} のランクが 2 で、共通の特異値を持つことであることが知られている [Huang 1989]。このとき \mathbf{b} は、 \mathbf{E} の Null-space として下記のとおり求めることができる。

$$(\mathbf{b}' \mathbf{E})^T = \mathbf{E}' \mathbf{b} = \mathbf{o} \quad (7)$$

しかし、一般には \mathbf{E} に誤差が含まれる [Phillip 1991]。この場合は以下の方法をとる。

まず、 \mathbf{E} を、 $|b| = \left| \begin{pmatrix} b_x & b_y & b_z \end{pmatrix} \right| = 1$ となるように正規化する。これは

$\mathbf{E}' \mathbf{E} = \text{tr}[\mathbf{E} \mathbf{E}'] = \text{tr}[\mathbf{B} \mathbf{B}'] = 2b^2$ だから、 $|E|^2 = 2$ となるように各要素を正規化することである。その後で、以下の最適化を行う。

$$\begin{aligned} |E^t b|^2 &\leftarrow \min \\ \text{subject to } |b| &= 1 \end{aligned} \quad (8)$$

そのために、 E の特異値分解を行う。

$$E = V \Lambda U^t = V \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} U^t = (v_1 \mid v_2 \mid v_3) \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1' \\ u_2' \\ u_3' \end{pmatrix} \quad (9)$$

なおこのとき、 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ である。求める解は

$$b = \pm v_3 \quad (10)$$

$$R = \mp v_2 u_1' \pm v_1 u_2' + v_3 u_3' \quad (11)$$

となる。

(2.3.7) ホモグラフィー

本問題は、特徴点がある未知の平面上に存在する拘束がある場合に、2つの位置・方向未知のカメラで撮影した特徴点の画像から、未知パラメータを求める問題である。問題は以下のように定義される。

いま、異なる位置、方向から撮影した2枚の画像が与えられ、 N 個の特徴点の画像 m_i ($i = 1, 2, \dots, N$) および m'_i ($i = 1, 2, \dots, N$) が観測される。特徴点は3次元空間内の、ある未知の平面上に存在するものとする。2枚の画像間のカメラ相対位置 b 、相対回転 R を求める。

解は次のようにして求められる。まず、観測パラメータから以下の N 個の透視投影基本式が得られる。

$$\alpha'_i m'_i = R(\alpha_i m_i - b) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

特徴点が、平面（法線ベクトル h 、原点からの距離 d 、ここで h, d は未知）上に存在するための条件式は

$$\alpha_i h^t m_i = d \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

これより、 $\frac{\alpha_i h^t m_i}{d} = 1$ が言える。これを式(1)に代入して

$$\alpha'_i \mathbf{m}'_i = R \left(\alpha_i \mathbf{m}_i - b \frac{\alpha_i h' \mathbf{m}_i}{d} \right) = \alpha_i R \left(I - \frac{1}{d} b h' \right) \mathbf{m}_i \quad (3)$$

ここで

$$A = R \left(I - \frac{1}{d} b h' \right) \quad (4)$$

$\mu'_i = \alpha'_i / \alpha_i$ と置くと、式 (3) は

$$\mu'_i \mathbf{m}'_i = A \mathbf{m}_i \quad (5)$$

とあらわすことができる。この式(5) が、平面仮定に基づく 2 枚の画像間の関係を示す基本式 (homography) である。

μ' を任意とすると、 A はスケールに関して自由となるため、以下のパラメータであらわすことができる。

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$\mathbf{m}'_i = \text{normalize} \begin{bmatrix} x' & y' & f \end{bmatrix}^T$ だから式(5)(6) より

$$f(a_{11}x'_i + a_{12}y'_i + a_{13}f) = x_i(a_{31}x'_i + a_{32}y'_i + f) \quad (7)$$

$$f(a_{21}x'_i + a_{22}y'_i + a_{23}f) = y_i(a_{31}x'_i + a_{32}y'_i + f) \quad (8)$$

が得られる。 $i = 1, 2, \dots, N$ を考えて整理すると

$$\begin{pmatrix} fx'_1 & fy'_1 & f^2 & 0 & 0 & 0 & -x_1x'_1 & -x_1y'_1 \\ 0 & 0 & 0 & fx'_1 & fy'_1 & f^2 & -y_1x'_1 & -y_1y'_1 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & fx_N & fy'_N & f^2 & -y_Nx'_N & -y_Ny'_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \\ a_{32} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1f \\ y_1f \\ \vdots \\ y_Nf \end{pmatrix} \quad (9)$$

となる。これを解いて A が求まる。

次に、 A が与えられたときに、2 枚の画像間の相対位置 b と回転 R 、および特徴点の乗る平面のパラメータ h, d に分解する [Svensson 1987]。

A より、polarity matrix G を以下のように算出する。

$$\mathbf{G} = \mathbf{A}' \mathbf{A} \quad (10)$$

\mathbf{G} を以下のように固有値分解し、 $\lambda_1^2 > \lambda_2^2 > \lambda_3^2$ となるように並べ替える

$$\mathbf{G} = \mathbf{U} \begin{pmatrix} \lambda_1^2 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^2 \end{pmatrix} \mathbf{U}' \quad (11)$$

エピポーラを e とすると、未知パラメータ h, e, d, b はそれぞれ以下のように求まる。なおここで $\mathbf{U} = (u_1 \mid u_2 \mid u_3)$ である。

$$h = \mp \frac{\sqrt{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}}{\sqrt{\lambda_1^2 - \lambda_3^2}} u_1 + \frac{\sqrt{\lambda_2^2 - \lambda_3^2}}{\sqrt{\lambda_1^2 - \lambda_3^2}} u_3 \quad (12)$$

$$e = \pm \frac{\lambda_3 \sqrt{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}}{\lambda_2 \sqrt{\lambda_1^2 - \lambda_3^2}} u_1 + \frac{\lambda_1 \sqrt{\lambda_2^2 - \lambda_3^2}}{\lambda_2 \sqrt{\lambda_1^2 - \lambda_3^2}} u_3 \quad (13)$$

$$d = \frac{\lambda_2}{(\lambda_1 - \lambda_3)} \quad (14)$$

$$b = \frac{1}{d} e \quad (15)$$

図2は、このときの各点の画像上での関係を図示したものである。

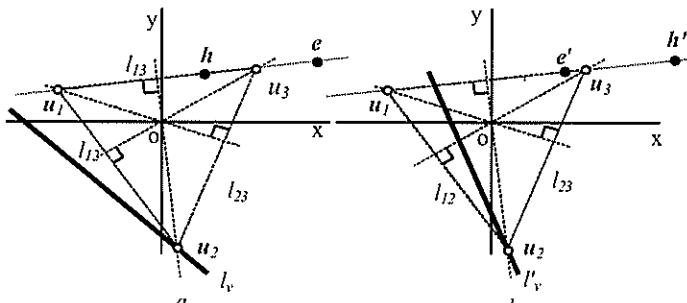


図2 e, h, u_1, u_2, u_3 の画像上位置 [Moriya 2000 c]

(2.3.8) 4点問題

本問題では、位置・方向未知の3つのカメラで撮影された特徴点画像が与えられたときに、未知パラメータを求める。その際に必要最小限の特徴点数を用いるものである。問題は以下のように定

義される。

いま、異なる位置、方向から撮影した3枚の画像が与えられ、4個の特徴点の画像 \mathbf{m}_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) , \mathbf{m}'_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) , \mathbf{m}''_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) が観測される。4枚の画像間のカメラ相対位置 $\mathbf{b}^{(1)}$, $\mathbf{b}^{(2)}$, 相対回転 $\mathbf{R}^{(1)}$, $\mathbf{R}^{(2)}$ を求める。

解は次のようにして求められる。まず、観測パラメータから以下の透視投影基本式が得られる。

$$\alpha'_i \mathbf{m}'_i = \mathbf{R}^{(1)} (\alpha_i \mathbf{m}_i - \mathbf{b}^{(1)}) \quad (i = 1, 2, \dots, 4) \quad (1)$$

$$\alpha''_i \mathbf{m}''_i = \mathbf{R}^{(2)} (\alpha_i \mathbf{m}_i - \mathbf{b}^{(2)}) \quad (i = 1, 2, \dots, 4) \quad (2)$$

式(1)(2)は、未知数が α , α' , α'' について 12, $\mathbf{R}^{(1)}, \mathbf{R}^{(2)}$ について 6, $\mathbf{b}^{(1)}, \mathbf{b}^{(2)}$ について 6, 合計 24 あるが、スケールに関する自由度が 1 があるので、実質的な未知数は $24-1=23$ である。これに対して、方程式の数は各式について 3 行あるので $3 \times 2 \times 4 = 24$ となる。

以上から、上記連立方程式は 1 パラメータ分の冗長度を持つ。これを代数的に直接求めることは極めて困難で、数値計算的手法の利用が不可欠であると考えられる。現実的な計算量で求めるための工夫などが提案されている。

(2.3.9) tri-linear テンソル

本問題では、位置・方向未知の3つのカメラで撮影された特徴点画像が与えられたときに、未知パラメータを求める。その際に、必要以上に冗長性をもたせた特徴点数を用いることで、計算を容易にしようとするものである。問題は以下のとおり定義される。

異なる位置、方向から撮影した3枚の画像が与えられ、N個の特徴点の画像 \mathbf{m}_i ($i = 1, 2, \dots, 4$), \mathbf{m}'_i ($i = 1, 2, \dots, 4$), \mathbf{m}''_i ($i = 1, 2, \dots, 4$) が観測される。3枚の画像間のカメラ相対位置 $\mathbf{b}^{(1)}, \mathbf{b}^{(2)}$, 相対回転 $\mathbf{R}^{(1)}, \mathbf{R}^{(2)}$ を求める。解は次のようにして求められる。

観測パラメータから以下の透視投影基本式が得られる。

$$\alpha'_i \mathbf{m}'_i = \mathbf{R}^{(1)} (\alpha_i \mathbf{m}_i - \mathbf{b}^{(1)}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

$$\alpha''_i \mathbf{m}''_i = \mathbf{R}^{(2)} (\alpha_i \mathbf{m}_i - \mathbf{b}^{(2)}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

式(1)(2)から、 $\mathbf{R}^{(1)} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^{(1)} & \mathbf{r}_2^{(1)} & \mathbf{r}_3^{(1)} \end{pmatrix}^t$, $\mathbf{R}^{(2)} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^{(2)} & \mathbf{r}_2^{(2)} & \mathbf{r}_3^{(2)} \end{pmatrix}$ において α' , α'' を消去すると、以下の4式が得られる。

$$\alpha \left(y'_i \left(\mathbf{r}_1^{(1)}, \mathbf{m}_i \right) - x'_i \left(\mathbf{r}_2^{(1)}, \mathbf{m}_i \right) \right) = y'_i a^{(1)} - x'_i b^{(1)} \quad (3)$$

$$\alpha \left(z'_i \left(\mathbf{r}_1^{(1)}, \mathbf{m}_i \right) - x'_i \left(\mathbf{r}_3^{(1)}, \mathbf{m}_i \right) \right) = z'_i a^{(1)} - x'_i c^{(1)} \quad (4)$$

$$\alpha \left(y_i'' \left(r_1^{(2)}, \mathbf{m}_i \right) - x_i'' \left(r_2^{(2)}, \mathbf{m}_i \right) \right) = y_i'' a^{(2)} - x_i'' b^{(2)} \quad (5)$$

$$\alpha \left(z_i'' \left(r_1^{(2)}, \mathbf{m}_i \right) - x_i'' \left(r_3^{(2)}, \mathbf{m}_i \right) \right) = z_i'' a^{(2)} - x_i'' c^{(2)} \quad (6)$$

なおここで $\begin{pmatrix} a^{(1)} & b^{(1)} & c^{(1)} \end{pmatrix}^t = \mathbf{R}^{(1)} \mathbf{b}^{(1)}$, $\begin{pmatrix} a^{(2)} & b^{(2)} & c^{(2)} \end{pmatrix}^t = \mathbf{R}^{(2)} \mathbf{b}^{(2)}$, $(x'_i \ y'_i \ z'_i)^t = \mathbf{m}'_i$,

$(x''_i \ y''_i \ z''_i)^t = \mathbf{m}''_i$ である。式(3)(4)と式(5)(6)の組み合わせにより α を消去して

$$y' y'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_1^{(1)} \right) - x' y'' \mathbf{m}_i \left(b^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_2^{(1)} \right) - y' x'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_2^{(2)} - b^{(2)} r_1^{(1)} \right) + x' x'' \mathbf{m}_i \left(b^{(1)} r_2^{(2)} - b^{(2)} r_2^{(1)} \right) = 0 \quad (7)$$

$$y' z'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_1^{(1)} \right) - x' z'' \mathbf{m}_i \left(b^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_2^{(1)} \right) - y' x'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_3^{(2)} - c^{(2)} r_1^{(1)} \right) + x' x'' \mathbf{m}_i \left(b^{(1)} r_3^{(2)} - c^{(2)} r_2^{(1)} \right) = 0 \quad (8)$$

$$z' y'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_1^{(1)} \right) - x' y'' \mathbf{m}_i \left(c^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_3^{(1)} \right) - z' x'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_2^{(2)} - b^{(2)} r_1^{(1)} \right) + x' x'' \mathbf{m}_i \left(c^{(1)} r_2^{(2)} - b^{(2)} r_3^{(1)} \right) = 0 \quad (9)$$

$$z' z'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_1^{(1)} \right) - x' z'' \mathbf{m}_i \left(c^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_3^{(1)} \right) - z' x'' \mathbf{m}_i \left(a^{(1)} r_3^{(2)} - c^{(2)} r_1^{(1)} \right) + x' x'' \mathbf{m}_i \left(c^{(1)} r_3^{(2)} - c^{(2)} r_3^{(1)} \right) = 0 \quad (10)$$

が得られる。

すべての点 ($i = 1, 2, \dots, N$) を考えて式(7)(8)(9)(10)を書き換えて

$$\begin{pmatrix} y'_1 y''_1 \mathbf{m}'_1 & -y'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & o & -x'_1 y''_1 \mathbf{m}'_1 & x'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & o & o & o & o \\ y'_1 z''_1 \mathbf{m}'_1 & o & -y'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & -x'_1 z''_1 \mathbf{m}'_1 & o & x'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & o & o & o \\ z'_1 y''_1 \mathbf{m}'_1 & -z'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & o & o & o & -x'_1 y''_1 \mathbf{m}'_1 & x'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & o & o \\ z'_1 z''_1 \mathbf{m}'_1 & o & -z'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & o & o & -x'_1 z''_1 \mathbf{m}'_1 & o & x'_1 x''_1 \mathbf{m}'_1 & o \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \left(a^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_1^{(1)} \right) \\ \left(a^{(1)} r_2^{(2)} - b^{(2)} r_1^{(1)} \right) \\ \left(a^{(1)} r_3^{(2)} - c^{(2)} r_1^{(1)} \right) \\ \left(b^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_2^{(1)} \right) \\ \left(b^{(1)} r_2^{(2)} - b^{(2)} r_2^{(1)} \right) \\ \left(b^{(1)} r_3^{(2)} - c^{(2)} r_2^{(1)} \right) \\ \left(c^{(1)} r_1^{(2)} - a^{(2)} r_3^{(1)} \right) \\ \left(c^{(1)} r_2^{(2)} - b^{(2)} r_3^{(1)} \right) \\ \left(c^{(1)} r_3^{(2)} - c^{(2)} r_3^{(1)} \right) \end{pmatrix} = \mathbf{o} \quad (11)$$

が得られる。以上より $Mt = \mathbf{o}$ の関係であらわされる 27 次元線形方程式となり、これを解いて未知パラメータ t が求められる。なおここで、 $3 \times 3 \times 3$ のテンソル T_{ijk} を以下のとおり定義する。

$$T_{ijk} = t_{(k \times 3 \times 3 + j \times 3 + i)} \quad (12)$$

t_f は 27 次元ベクトル t の f 番目の要素である。

次に、テンソル T_{ijk} が与えられたときに、これを 3 枚の画像間のカメラ相対位置 $b^{(1)}, b^{(2)}$ 、および相対回転 $R^{(1)}, R^{(2)}$ に分解する。

$$\text{回転軸方向を示すベクトルをそれぞれ } r_1^{(1)} = \begin{pmatrix} r_{11}^{(1)} & r_{12}^{(1)} & r_{13}^{(1)} \end{pmatrix}^t, \quad r_2^{(1)} = \begin{pmatrix} r_{21}^{(1)} & r_{22}^{(1)} & r_{23}^{(1)} \end{pmatrix}^t,$$

$$r_3^{(1)} = \begin{pmatrix} r_{31}^{(1)} & r_{32}^{(1)} & r_{33}^{(1)} \end{pmatrix}^t, \quad r_1^{(2)} = \begin{pmatrix} r_{11}^{(2)} & r_{12}^{(2)} & r_{13}^{(2)} \end{pmatrix}^t, \quad r_2^{(2)} = \begin{pmatrix} r_{21}^{(2)} & r_{22}^{(2)} & r_{23}^{(2)} \end{pmatrix}^t, \quad r_3^{(2)} = \begin{pmatrix} r_{31}^{(2)} & r_{32}^{(2)} & r_{33}^{(2)} \end{pmatrix}^t \quad \text{と}$$

おき、以下のベクトルを定義する。

$$\tilde{r}_1^{(1)} = \begin{pmatrix} a^{(1)} \\ b^{(1)} \\ c^{(1)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_{11}^{(1)} \\ r_{21}^{(1)} \\ r_{31}^{(1)} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\tilde{r}_2^{(1)} = \begin{pmatrix} a^{(1)} \\ b^{(1)} \\ c^{(1)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_{12}^{(1)} \\ r_{22}^{(1)} \\ r_{32}^{(1)} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\tilde{r}_3^{(1)} = \begin{pmatrix} a^{(1)} \\ b^{(1)} \\ c^{(1)} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_{13}^{(1)} \\ r_{23}^{(1)} \\ r_{33}^{(1)} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$\text{ここで、 } T_i = \begin{pmatrix} T_{i11} & T_{i12} & T_{i13} \\ T_{i21} & T_{i22} & T_{i23} \\ T_{i31} & T_{i32} & T_{i33} \end{pmatrix} \text{ とおくと}$$

$$T_i = \begin{pmatrix} a^{(1)}r_{1i}^{(2)} - a^{(2)}r_{1i}^{(1)} & a^{(1)}r_{2i}^{(2)} - b^{(2)}r_{1i}^{(1)} & a^{(1)}r_{3i}^{(2)} - c^{(2)}r_{1i}^{(1)} \\ b^{(1)}r_{1i}^{(2)} - a^{(2)}r_{2i}^{(1)} & b^{(1)}r_{2i}^{(2)} - b^{(2)}r_{2i}^{(1)} & b^{(1)}r_{3i}^{(2)} - c^{(2)}r_{2i}^{(1)} \\ c^{(1)}r_{1i}^{(2)} - a^{(2)}r_{3i}^{(1)} & c^{(1)}r_{2i}^{(2)} - b^{(2)}r_{3i}^{(1)} & c^{(1)}r_{3i}^{(2)} - c^{(2)}r_{3i}^{(1)} \end{pmatrix} \quad (16)$$

だから

$$T_i \tilde{r}_i = o \quad (17)$$

が成り立つ。これを解いて $\tilde{r}_i^{(1)}$ ($i=1,2,3$) が求まる。 $(a^{(1)} \quad b^{(1)} \quad c^{(1)})$ はすべての $\tilde{r}_i^{(1)}$ に垂直だから

$$\begin{pmatrix} a^{(1)} \\ b^{(1)} \\ c^{(1)} \end{pmatrix} = \lambda^{(1)} \{\tilde{r}_2 \times \tilde{r}_3\} \quad (18)$$

となり 定数倍の自由度を除いて $\begin{pmatrix} a^{(1)} & b^{(1)} & c^{(1)} \end{pmatrix}$ が求まる。以下同様にして $\begin{pmatrix} a^{(2)} & b^{(2)} & c^{(2)} \end{pmatrix}$ が求まる。

$e_i = \begin{pmatrix} r_{1i}^{(1)} & r_{2i}^{(1)} & r_{3i}^{(1)} \end{pmatrix}$ とおいて、式(16) を書き直して

$$\tilde{r}_i = a^{(1)} \times e_i \quad (i=1,2,3) \quad (19)$$

これより

$$(\tilde{r}_i, e_i) = 0 \quad (i=1,2,3) \quad (20)$$

以上の関係より

$$e_1 = \alpha N[(\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)] + \sqrt{1-\alpha^2} N[(\tilde{r}_1 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2))] \quad (21)$$

$$e_2 = \beta N[(\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)] + \sqrt{1-\beta^2} N[(\tilde{r}_2 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2))] \quad (22)$$

$$e_3 = \gamma N[(\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)] + \sqrt{1-\gamma^2} N[(\tilde{r}_1 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2))] \quad (23)$$

$(e_i, e_j) = 0 \quad (i \neq j)$ の関係があるから式(21)(22)(23) より

$$\alpha\beta + (N[\tilde{r}_1 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)], N[\tilde{r}_2 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)]) \sqrt{1-\alpha^2} \sqrt{1-\beta^2} = 0 \quad (24)$$

$$\beta\gamma + (N[\tilde{r}_2 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)], N[\tilde{r}_3 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)]) \sqrt{1-\beta^2} \sqrt{1-\gamma^2} = 0 \quad (25)$$

$$\gamma\alpha + (N[\tilde{r}_3 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)], N[\tilde{r}_1 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)]) \sqrt{1-\gamma^2} \sqrt{1-\alpha^2} = 0 \quad (26)$$

ここで

$$A = \frac{1}{(N[\tilde{r}_1 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)], N[\tilde{r}_2 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)])} \quad (27)$$

$$B = \frac{1}{(N[\tilde{r}_2 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)]_1 N[\tilde{r}_3 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)]_2)} \quad (28)$$

$$C = \frac{1}{(N[\tilde{r}_3 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)]_2 N[\tilde{r}_1 \times (\tilde{r}_1 \times \tilde{r}_2)]_3)} \quad (29)$$

とおくと

$$A\alpha\beta + \sqrt{1-\alpha^2} \sqrt{1-\beta^2} = 0 \quad (30)$$

$$B\beta\gamma + \sqrt{1-\beta^2} \sqrt{1-\gamma^2} = 0 \quad (31)$$

$$C\alpha\gamma + \sqrt{1-\alpha^2} \sqrt{1-\gamma^2} = 0 \quad (32)$$

これを解いて

$$\alpha = \sqrt{\frac{B^2 \pm ABC}{B^2 - A^2 C^2}} \quad (33)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{C^2 \pm ABC}{C^2 - A^2 B^2}} \quad (34)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{A^2 \pm ABC}{A^2 - B^2 C^2}} \quad (35)$$

以上より、回転行列 $R^{(ij)}$ が求まる。

(2.3.10) factorization method

本問題は、平行投影モデルを仮定したときに、N 個の特徴点の F 枚のカメラ画像から 3 次元推定を行うものである。問題は以下のように定義される。

いま、異なる位置、方向から撮影した F 枚の画像が与えられ、それぞれの画像において N 個の特徴点 $m_i(f)$ ($i = 1, 2, \dots, N, f = 1, 2, \dots, F$) が観測される。それぞれのカメラの相対位置 $b^{(1)} \dots b^{(F)}$ 、相対回転 $R^{(1)} \dots R^{(F)}$ を求める。ただし、平行投影を仮定するものとする。

解は次のように求められる。

いま、平行投影モデルの基本式を以下のようにあらわすことができる。

$$x = (r_x, (P - B)) \quad (1)$$

$$y = (r_y, (P - B)) \quad (2)$$

なおここで、 r_x, r_y はワールド座標表現によるカメラ座標の x 方向および y 方向である。上式の正規化を下記のとおり行う。

$$\tilde{x} = x + (r_x, B) \quad (3)$$

$$\tilde{y} = y + (r_y, B) \quad (4)$$

特徴点番号 $n = 1, 2, \dots, N$ と、画像（カメラ）番号 $f = 1, 2, \dots, F$ について並べて

$$\begin{array}{c} \text{特徴点番号} \longrightarrow \\ \text{画像番号} \downarrow \end{array} \left(\begin{array}{cccc} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{F1} & \tilde{x}_{F2} & \cdots & \tilde{x}_{FN} \\ \tilde{y}_{11} & \tilde{y}_{12} & \cdots & \tilde{y}_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{y}_{F1} & \tilde{y}_{F2} & \cdots & \tilde{y}_{FN} \end{array} \right) = W \quad (5)$$

によってあらわされる観測行列 W が定義される。 W のランクが 3 になるとの条件のもと、特異値分解を以下のとおり行う。

$$W = QP = \begin{pmatrix} r_{x1}^T \\ \vdots \\ r_{xF}^T \\ r_{y1}^T \\ \vdots \\ r_{yF}^T \end{pmatrix} (P_1 \ P_2 \ \dots \ P_N) \quad (6)$$

ここで Q はカメラパラメータを示す運動行列、 P は特徴点の 3 次元位置を示す形状行列と呼ばれるものである。

以上述べたのは、平行投影モデルを仮定した方法であるが、これを透視投影モデルに拡張した方法も研究されている。

(2. 4) おわりに

撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）の扱い方や、ビジョンベースによるカメラ位置の制御方法に関する共通基盤技術の準備のため、コンピュータビジョン（3 次元画像認識技術）に関する基礎技術をサーベイした。これらの技術が今後の研究において直接的に利用できるとは限らないが、そこで述べられている基本的な考え方は、

本研究の固有な条件に当てはまるよう適宜修正・発展させて活用していくことが可能である。

5 - 1 - 3 - 3 課題ア-3 に関する研究開発実施内容のまとめ

本年度は、IPD 用映像制作・編集過程におけるスクリーン形状やプロジェクタ構成の違いに対応する IPD 固有の映像編集処理と、それらに関する諸課題を列挙し、その課題解決に必要となる既存技術の調査を行った。さらに、撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）の扱い方や、ビジョンベースによるカメラ位置の制御方法に関する共通基盤技術の準備のため、コンピュータビジョン（3 次元画像認識技術）に関する基礎技術についてのサーベイを行った。

5 - 1 - 4 ア-4 リアルタイム映像制作技術

課題ア-2で開発する技術の実社会における適用を考え、そのリアルタイム化を中心としたアプリケーション技術の開発に取り組む。具体的には下記のとおり2つにテーマを分け、研究を進める。

- ① 複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術
- ② マルチカメラによる遠隔監視システムプロトタイプの開発

5 - 1 - 4 - 1 本年度の研究開発目標

(1) 実験デモンストレーションシステムの全体構想策定

テーマ②の開発ならびにそれに必要となる主要設備の選定を行うため、実験デモンストレーションシステムの全体構想を策定する。

(2) 実験設備の選定と調達

テーマ①実施のための実験設備および、テーマ②開発に必要となる主要設備の選定と調達を行う。

5 - 1 - 4 - 2 実施内容

(1) 実験デモンストレーションシステムの全体構想策定

(1. 1) 全体構想

実験デモンストレーションシステムの全体構想を下記により策定した。

複数のビデオカメラを異なる方向を向くように配置し、これらによって撮影された映像の射影変換処理を行い、お互いをシームレスにつなぎ合わせることで1枚の超高精細・広視野角の映像を取得するシステムを構成する。カメラシステムは実質的にNTSC解像度を持つ5台以上のカメラより構成される。このため実験デモンストレーションシステムでは6台のカメラシステムより構成するものとする。

カメラシステムにて撮影される映像データを繋ぎ目の目立たない1枚の画像に変換するための画像の幾何学的・色的補正手法、および射影変換処理のリアルタイム化を実現するための各カメラの位置や方向、色特性、レンズ歪みなどをあらかじめ測定し、それらを考慮に入れた画像変換パラメータを算出するキャリブレーション機能、ならびにその変換パ

ラメータに従い、撮影データをリアルタイムに変換する機能を持たせる必要がある。このとき高解像度映像を高速に処理するため、大規模な計算能力が必要となるため並列計算システムを構築するものとする。

また、マルチカメラによる遠隔監視システムプロトタイプの開発のためのシステムとしても利用できるものとする。このため 6 台のマルチカメラで映像を撮影し、ギガビット LAN で映像データを送り、6 台の IPD 映像表示システムでリアルタイム表示ができる構成とするものとする。

(1. 2) 実験デモンストレーションシステムの構成

以上の全体構想を基に図 1 に示す実験デモンストレーションシステムを構成した。各構成品の機能はそれぞれ以下のとおりである。

- ① 6 台のカメラはマルチカメラによる遠隔監視システムプロトタイプにおける画像入力用手段として用いる。
- ② 画像入力ボードは上記カメラにて取り込んだ画像データの PC への入力用手段として用いる。
- ③ PC (入力用) は上記カメラで撮影した映像をディジタルデータとして取り扱い、ネットワークに配信する手段として用いる。
- ④ PC (出力用) は上記 PC から配信される映像データをネットワークを介して受信して、プロジェクタに出力する手段として用いる。
- ⑤ 画像処理コントローラは上記 PC から出力される映像をリアルタイム幾何・色変換する PA ボード (既存品) を制御する手段として用いる。
- ⑥ PCI 拡張ユニットは上記 PA ボードを搭載するための PCI バススロットとして用いる
- ⑦ RGB マトリックススイッチャは上記 PA ボードから出力される映像を、弊社既設プロジェクタアレイシステムにおける複数のプロジェクタに出力する際に、既存設備の出力信号との切り替えを行う。

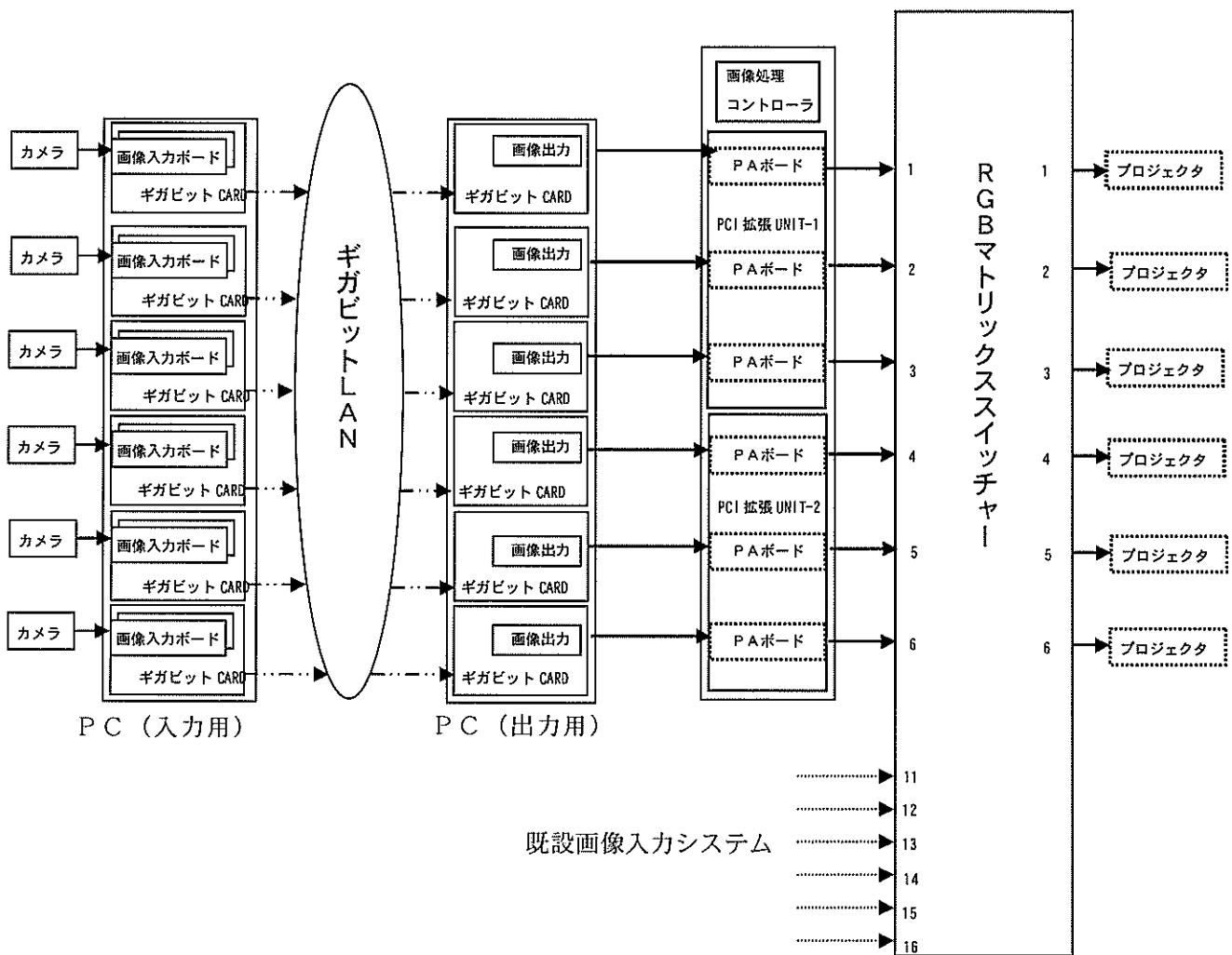


図1 実験デモンストレーションシステム 構成図

(2) 実験設備の選定と調達

(2. 1) 計算処理用汎用 PC の選定

高解像度映像を高速に処理するためには、大規模な計算能力が必要とされる。これまでには、大規模計算処理のためには専用 WorkStation の利用が不可欠であった。しかし近年、

PC(パーソナルコンピュータ)の性能が飛躍的に向上すると同時に、大量生産によって大幅にコストが下がっているため、PCを構成要素として構築される並列システムが、大規模計算の研究の主流になりつつある。

しかし、CG(コンピュータグラフィックス)による動画像制作などの、実用レベルでの計算処理においては、複数のCPUを搭載し、バスの幅を強化した専用計算機が使われることが未だに多い。これは、画像関係の計算においては、他の大規模計算に比べると一定の計算量に対して必要とされるデータ量の割合が大きく、プロセッサ間でデータ転送をおこなう遅延時間がボトルネックになりやすいためである。とはいえ、画像作成の効率的な並列化に関する研究は [Molnar 1994]などを嚆矢として盛んに行われている。実用レベルにおいても、[HolyWood]に見られるように、米ハリウッドでもPCによる並列システムを取り入れ始めており、ここ数年で確実にPC化の流れが進んでいる。現状において最大のボトルネック部分である計算機間をつなぐ通信速度が向上するにつれ、この並列システム重視の傾向はより増大するものと予測される。

オフラインの画像生成・画像処理システムが、並列化による台数効果の恩恵を受けて高速化が進んでいく一方で、並列処理を用いたリアルタイムの画像処理システムの実用化は比較的遅れている。これは画像処理において通信路を流れるデータの総量が莫大なものとなることに大きく関係している。オフラインの処理であれば、データ転送による計算処理の遅延もある程度許容されるが、リアルタイム処理においては、常に一定の速度で計算に必要な内部データの転送を行い続ける必要がある。このため、本研究の機器選定にあたっても、大容量データに対して一定のペースを保つてリアルタイム処理を行うためには、データ転送上のボトルネックとなりうる箇所のパフォーマンスを考慮して機器の選択を行う必要があった。具体的には、HDDなどのストレージ部分、メモリの転送速度、そしてネットワーク転送速度である。

各計算ユニットであるPCの性能には制約があるため、現状においては一定の画像計算の処理を行うためには、より多くの台数が必要になり、結果として計算機間のデータ転送量がより大きくなっている。しかし、各計算機の処理能力が強力になることで、計算機間で行われる、内部データの転送量自体を減少させることができる。各計算ユニットの計算処理能力が向上すると、大きい粒度の計算タスクを単一の計算ユニットで処理することができるため、タスクの間でのデータ依存性の少ない切り分けをおこなうことができるようになる。このため、各計算機の性能向上によるデータ転送容量の削減効果は、単純な台数効果以上のメリットがある。

以上を考慮し、現在入手可能な製品の中から、上記のボトルネックを回避、削減することができるスペックを想定して選定を行った。

以下、選定したPCの仕様を記述する。

(2. 1. 1) Precision Workstation 340

並列計算システムのユニットとして用いる汎用 PC には、13 台の DELL 社製 Precision Workstation 340 [DELL a] を選定した。

この製品では、様々なスペックの選択肢からコーディネイトを行うことができる。今回調達したスペックは以下のとおりである。

[1] CPU

この製品は、CPU として intel 社製 Pentium4 2.20GHz、チップセットには i850 を採用している。2002 年現在の現状においては、この CPU は市販の PC レベルにおいてはハイエンドに近い高速な CPU である。

[2] メモリ

メモリとして 256MB の RDRAM を 2 枚ずつ、計 512MB 搭載している。画像処理では、計算処理に対してデータサイズが大きい。このため、データがメモリに読み書きされることによるボトルネックが軽減するように、高速な PC800 メモリを採用した。これは、PC で利用する Direct RDRAM の一種であり、最大 800MHz (400MHz×2 倍) のクロックで稼働するものである。

[3] LAN 環境

ネットワーク転送を行う LAN アダプタには BROADCOM 社の Gigabit Ethernet を採用している。

このネットワークアダプタは、10Mbps, 100Mbps, 1000Mbps の転送速度に対応することができる。このネットワーク環境を用いることで、課題(イ)の実験等を行うことを予定している。

また、これとは別系統で 100MByte Ethernet(オンボード)が装備されており、PC の制御等の処理はこちから行うことを想定している。これは、ネットワークの転送速度実験を正確に行うためと、転送実験のために特殊なネットワークトポロジー(peer-to-peer の並列接続など)を行う場合を考慮したものである。この製品では、PCI-X データ バースト転送を利用してことで、10Mbps, 100Mbps, 1000Mbps の転送速度に対応することができる。このネットワーク環境を用いることで、課題(イ)の実験等を行うことを予定している。

また、これとは別系統で 100MByte Ethernet が装備されており、PC の制御等の処理はこちから行うことを想定している。これは、ネットワークの転送速度実験を正確に行うためと、転送実験のために特殊なネットワークトポロジー(peer-to-peer の並列接続など)を行う場合を考慮したものである。

[4] Graphic Accelerator

PC 分野で近年目覚ましい性能の向上を見せているのが、Graphic Accelerator 機構である。

画像処理技術に特化したチップを搭載することで、汎用 PC の画像作成能力は（ポリゴンなどの描画においては）かつての大型計算機を上回るものとなっている。2002 年現在の現状においては、この分野は米 nVidia 社の GeForce シリーズと、ATI 社の Radeon シリーズが 2 大勢力となっている。今回の調達において入手した PC には、グラフィックアクセラレータとして nVidia 製 Quadro2EX が装備されている（VRAM は 32MB）。このボードでは 3D 処理用のジオメトリエンジンが発達しているため、画像出力処理に割かれる CPU の負荷を軽減させることができる。これにより、研究実験の主目的である入力画像の処理に CPU の性能を十分に注力させることができる。

[5] ハードディスク

前述のとおり、画像処理は計算処理に対してデータサイズが大きい。単一の計算機上でデータを取り扱うに当たっては、高速なキャッシュメモリ、汎用主記憶メモリ、そしてハードディスクをはじめとするストレージシステムといった、データ保持の各種システムが用いられるが、これらの機器間ではデータの読み書き処理の速度に大きな差がある。このため、最も低速な記憶装置であるハードディスクのアクセスが、しばしば計算処理のボトルネックとなる。

そこで、ローカルハードディスクとして 10000 回転の Ultra 160 SCSI を採用した。従来の Ultra2Wide SCSI が秒間 80MByte の転送速度だったことに比べて、ほぼ 2 倍の秒間 160MByte (理論値) の転送速度を備えている。

[6] OS

オペレーティングシステムとして、Windows2000 Professional SP2 日本語版を搭載している。

[7] 制御機構

各 PC の入出力は、キーボード、および PC 切り替え器と、表示画面の出力情報をつなぎかえるマトリクススイッチャを通すことで一括管理されている。

このマトリクススイッチャは各 PC を制御するモニタ管理のみでなく、IPD 装置に出力する際にも用いることが可能となっている。

(2. 2) カメラの選定

本研究において入力機器の持つ役割は大きく、動画像撮影用のカメラの選択は重要である。

課題研究を行うための実験において想定される様々な制約条件を満たすために、数種類の異なる性質を持ったカメラを選定した。それぞれのカメラは、研究がその対象として想定する各状況において、現状では最もスタンダードな製品と判断されるものを入手してい

る。

これらのカメラを課題ごとに使い分けることで、実際の運用を想定した実用性の高い研究を行うことができる。

(2.2.1) 本研究において想定されるカメラの使用環境

本研究における技術上の主要な課題のひとつは、複数カメラによる視覚情報の取得と、シームレスな画像接続手法の確立にある。

上記の課題を、カメラの位置とその制約条件によって、分類した場合、表1のような条件をあげることができる。

表1 カメラの使用状況一覧

カメラの光学中心	カメラの方向	主要な必要特性	選定カメラ	想定課題
固定、同一	固定、周囲を向く	単一視点位置	Ladybug	補佐、比較対象
固定、異なる	固定、同一方向	3次元計測	Color Digiclops	補佐、比較対象
固定、異なる	固定、まちまち	高画質映像	DXC-9000	ア-2 (1)
固定、異なる	動的に可変	方向の制御が可能	SP-D22L	ア-4 (2)
動的に可変	動的に可変	軽量・高画質	XC-003	ア-2 (2)

[1] 固定カメラ間で光学中心が同一の場合

これは、各カメラの光学中心が一致しており、カメラの向いている方向だけが異なる場合である。またカメラの方向も固定であり、既存パラメータとして扱うことができる。このときの接続処理は、[Chen 1995] などで行われている Panoramic Mosaic Stitching の基本的な問題として捉えることができ、既に実用化のレベルにある。

この既存技術を利用ためのカメラとして Ladybug (後述) を選定した。これは全周囲画像を複数カメラで撮るという機能を実現させた製品であり、各カメラの光学中心も数センチメートルの距離に配置されているため、遠距離を撮影する場合にはほぼ同一の光学中心であるとみなすことができる。

[2] 固定カメラの光学中心が異なる場合

これは、各カメラの光学中心の位置や、レンズの方向が共に固定（静的）ではあるが、カメラの光学中心の位置が一致していない場合である。特殊な光学系の導入や構造上の工夫を行うことなく、単純に並べて、並列に設置されたカメラはこの状態になる。この状態

の画像を接続する方法については、[Szeliski 1997] などにおいて研究が行われている。

このときには、カメラの位置、方向についてのパラメータは、撮影された画像や、物理的配置状況から推定・計測されなければならない。また、この条件においては、撮影された画像から単一の全周囲画像を得ることは、厳密にいえば理論上不可能である。

しかし、本研究の目標のひとつである、複数カメラによる高画質映像の撮影を想定すると、このような制約条件が生まれることは十分考えられることである。なぜなら、汎用のカメラを用いた場合、その物理的・機構的な制限により、単一視点制約を満たすような配置に設置することは極めて困難であるからである。

一方、単一視点制約を満たすような特殊なカメラを開発し、これを利用することも考えられるが、実際の運用を考えると、ハードウェアレベルで完全にシステム化された専用カメラを用いるよりは、必要とされる撮影状況や画質に応じて、システムの構成が変化可能となるように、複数台の汎用カメラを配置して撮影を行う方式を採用する方が、柔軟性の点で優れると同時に、コストパフォーマンスを抑えることも可能となるであろう。

よって、この構成を実現するためには、カメラパラメータ推定や、光学中心の異なるカメラで撮影した映像から擬似的な接続画像を作成する手法の検討は極めて重要な問題である。

このような高画質映像作成を考慮した条件下での研究のために、高品質な動画を撮影できるカメラとして、DXC-9000（後述）を選定した。

また、上記のような単一視点画像へと統合する方針とは逆に、複数の視点位置によって撮影された画像の視差情報から、画像の奥行き情報を得るという研究も盛んである。この技術を利用するためのカメラとして、Color Digiclops（後述）を選定した。

[3] カメラ位置は固定であり、方向のみが動的に可変である場合

カメラの条件が動的に変化する場合、画像の幾何変換処理の行列や、調整用パラメータを動的に変化させる必要が生まれ、上記の条件よりも技術的に困難な処理を要求される。

このような条件が生じる一例として、カメラに回転の自由度が加わっていた場合をあげることができる。

広い視野角の映像を取得する手段として、レンズの種類を変えることで画角を広げる方法が考えられるが、この場合解像度が不足する問題が生じる。視野角の限られたカメラであっても、カメラが回転可能であれば広い視野角を一台のカメラでカバーすることができ、また解像度的な問題も生じない。

この可動性の条件を満たしたカメラとして、代表的なドーム型監視カメラである SP-D22L（後述）を選定した。

[4] 光学中心とカメラ方向が共に動的に可変である場合

複数カメラの画像を接続するという本研究課題においての最も自由度の高い条件として、

カメラの位置と方向が共に動的に変化するというケースが考えられる。この場合、常に様々なパラメータを測定、推定し、それにあわせて動的に接続方法を変化させていく必要がある。移動するロボットが写す複数の画像データを統合して、単一の画像を得る作業などが、この条件に相当する。このような条件を想定した実験や研究を行うためには、ロボットなどの可動要素のあるハードウェアにカメラを設置する必要がある。しかし、実験用のハンドロボットなどのアクチュエータは十分な出力を有していないことが多い。そのため、この研究実験に対しては、軽量でかつ画像処理を行うのに十分高性能なカメラが必要となる。

この用途に用いるカメラとして XC-003（後述）を選定した。

(2.2.2) 画像処理におけるアプローチ

異なるカメラ位置の画像を接続する手法として、2種類のアプローチを考えることができる。一つは、画像毎にオブジェクトの分離、特徴点の抽出などの認識処理を行い、3次元情報を推定・抽出した上で、画像接続を試みるアプローチである。また、もうひとつは、何らかの近似的な前提条件の仮定を利用することで、画像の変形と接続の処理を、アフィン変換などを用いた2次元画像処理の範囲内で行うものである。この仮定の有名な例としては、対象オブジェクトが单一平面上に存在しているとする仮定や、カメラの回転のみがおこなわれるとして自由度を制限する仮定などがある。

前者のアプローチである、複数視点画像からの3次元認識処理については [Se 2001] など多くの研究が行われている。しかし認識処理に失敗して誤った3次元情報を取得した場合には、接続後の画像にも目に見える大きな矛盾が発見されることが多い。

一方で、後者のアプローチでは、カメラの位置姿勢や対象物の形状に関する条件を含んでいるため、実際のカメラやオブジェクトの配置などにおいて、比較的厳しい制限を必要とする場合が多い。しかし、一般に変換速度は高速であり、一定の条件の範囲においては、人間が画像を観たときに繋ぎ目を感じさせない画像が得られる。

本研究においては、これら2種類のアプローチを比較検討し、様々な折衷的手法の提唱とその理論的考察を行うことが必要となるであろう。

この前者のアプローチを行う場合には、3次元情報の取得方法についての既存の研究成果を使うことで、効率的に研究を進めることができる。このためのカメラシステムとして Color Digiclops（後述）を選定した。

(2.2.3) カメラの仕様及び特徴

以下、各カメラの仕様と特徴を述べる。

(2.2.3.1) DXC-9000

高画質映像制作用のカメラとしては、Sony の DXC-9000 [Sony f] [Sony g] を採用した。

このカメラは以下に述べる理由から、マシンビジョン用途に用いた場合の精度が極めて

高いことで知られている。

[1] プログレッシブスキャンの採用

現在、通常に用いられている CCD ビデオにおいては、奇数フィールドと偶数フィールドの画素が異なる時間で読み出される。このため、高速で動く被写体に対しては、この時間差から映像のブレが生まれてしまうため、画像処理の精度がはなはだしく落ちる傾向があった。この問題を避けるために、このカメラではプログレッシブスキャン CCD を採用している。プログレッシブスキャン方式では、奇数フィールドと偶数フィールドの全画素を同時に読み出すため、ブレの少ない高解像度の画像を読み出すことができる。

[2] 画像処理特性

DXC-9000 では、CCD 画素のセル形状が $9.9 \mu\text{m}$ 四方の正方形となっている。このため、PC に入力した後に画像に対しアスペクト補正を行う必要が無いという、画像計測や画像認識の処理に適した特性を持っている。

画像の有効解像度は、水平解像度で 659 pixel、垂直解像度で 494 pixel 程度である（ただし、VGA モードにおいては、ノンインターレース画像 640×480 の出力となる）。

また、複数カメラをもちいて撮影、画像処理を行う場合、撮影タイミングの同期が重要となってくる。DXC-9000 では、画像撮影時の同期信号として、内部信号の出力、外部信号の入力端子が共に備わっており、同期信号の入力によって自動で切り替えるようになっている。

[3] 入出力

また画像の出力方式として、RGB, Y/C (9pin-DSub), VBS (12pin/BNC), の他に VGA 端子からの出力を選択することができる。

また RS-232C インタフェースを通して、カメラ調整とズームレンズパラメータのリモート操作をすることも可能である。

[4] カメラ特性

感度は 2000 lux (F5.6, 3200K) 相当であり、バネヨットマウント方式で接続される専用レンズ（後述）が設置されている。

シャッタースピードは 1/100 秒から 1/10000 秒までの間で 9 段階の切り替えが可能となっている。また、クリアスキャンモードを選択した場合、 $63.5 \mu\text{s}$ 単位でシャッター速度を切り替えて、コンピュータ用 CRT モニタ撮影時に現れるバー状の水平ノイズを軽減することも可能である。また、カメラ内部のフレームメモリに最大 8.5 秒までの画像を蓄えることで、照射光量が不足している場合の画像であっても明るく撮影することができる（AGC：オートゲインコントロール）。また、CCD アイリス機能を使用すると、過大な光量が入射した

ときにはシャッタースピードを調節して4絞り相当まで絞り込むことができる。

本体の外形寸法は 79(W)×72(H)×145(D) mm であり、これにレンズの長さが加わる。重量は本体で 790g となっている。

[5] レンズ

DXC-9000 のレンズとして VCL-0716BXA を別途選定した。これは Sony の CCD カメラ用の 1/2 型手動・電動 16 倍ズームレンズである。焦点距離は 7.3mm～117mm であり、16 倍のズーム比がある。

[6] その他

外形寸法は 108(W)×108(H)×187(D)mm、重量は約 800g。

(2. 2. 3. 2) XC-003

XC-003 [Sony h][Sony i] は Sony 製のマシンビジョン用のコンパクト 3CCD カメラである。このカメラはマシンビジョン用途に用いるにふさわしい性能を満たしているが、同じ Sony 製の DXC-9000 に比べ、小型、軽量であるため、ロボットによる制御実験など可動装置に設置する状況により適しているといえる。

[1] プリズムブロック方式

RGB の画像分離にプリズムブロック方式を用いているため、RGB 各画像が独立に解像度を持つことができる。垂直解像度は 485 ライン、水平解像度は RGB 換算で各色 739 画素となる。また、RGB の画素にずれが生まれないため、画像処理用途に用いたときに、高い精度を得ることができる。

[2] 入出力

出力インターフェースには RGB, Y/C (9pin-DSub), VBS (12pin/BNC), および RGB 用の Sync 出力が設置されている。また外部トリガーシャッタ機能により、カラーの瞬間画像を RGB で撮影することができる。

[3] カメラ特性

感度は F5.6 相当であり、C マウント方式を採用しているため、オプションのレンズを選択することも可能(後述)である。

最低被写体照度は 31 lux まで対応している。シャッタースピードは 1/100 秒から 1/10000 秒までの間で 8 段階切り替えが可能となっている。また、電荷の蓄積時間を使って、長時間露光での撮影にも対応している。

本体の外形寸法は 50(W)×56(H)×128(D)mm と DXC-9000 よりも 2 周りほど小型であ

る（このサイズにはレンズの長さは含まれない）。

重量は本体で 440g となっている。実験用マニュピレータなどにおいては、耐荷重が 1kg 程度であることが多いため、このカメラのサイズと性能の比率は極めて重要になってくる。

[4] レンズ

XC-003 に接続する C マウント方式のレンズとして、VCL25WM を選定した。これは焦点距離 25mm のレンズであり、重量 60g の小型レンズである。

(2. 2. 3. 3) Ladybug

全方位画像の撮影環境として、米 Point Gray Research 社の開発した Ladybug カメラ [PointGrayResearch a][Viewplus b] を選定した（このカメラの国内代理店は、株式会社 View PLUS 社が行っている）。

[1] 全方位性

このカメラでは、円筒状の壁面の 72° ごとに XGA 相当のプログレッシブ CCD カメラが 5 台設置されている。円筒上面にさらに 1 台の同機能のカメラが用意されており、これら計 6 台の CCD カメラで全方向の 75%をカバーするように設計されている。

カメラサイズが小さいため各レンズの光学中心がほぼ同一地点と近似することで、回転パラメータの推定によって全方位の画像を得ることができる。

また、この各面の画像を接続するためのソフトウェアが用意されている。各カメラの画像にはオーバーラップ部分が設けてあり、このオーバーラップ領域の対応オブジェクトを手動で設定することで、パノラマ画像を生成することができる。

[2] カメラ特性

各 CCD カメラ部分には Sony 製 ICX204AK color CCD（正方画素）を採用している。

15Hz で 10bit に A/D 変換を行い、プログレッシブ画像として撮影、専用ユニットへ画像を転送することができる。

[3] 入出力

このカメラが撮影した 6 つの画像は、蓄積ユニットと呼ばれる外部接続機器に光ファイバーによる専用ケーブル(1.0GB/s)を通して転送される。この蓄積ユニットは、IEEE1394 形式のケーブル(400Mbps 接続)で外部 PC に接続可能であり、このケーブルを通して画像データを転送する機能を有する。また、蓄積ユニット単体でも 4 台の内蔵 HDD を保有しており、この HDD を用いることで専用の圧縮形式(可逆)にした動画像を 30 分保存することもできるようになっている。

[4] カメラ制御

全方位画像を撮影するという基本設計のため、カメラ位置と画角は固定であり、ズームやレンズ可動などの機能は有していない。ただし、撮影後の画像に関するカラーの再構成とホワイトバランスは、ホスト側（接続した外部 PC）からコントロールできるようになっている。

[5] その他

本体の寸法は 88(W)×88(H)×106(D)mm である。周囲の視界を確保するため、三脚などで固定しての使用となる。

(2. 2. 3. 4) Color Digiclops

今回、3次元情報を計測するための一手段として選定した米 Point Gray Research 社の Color Digiclops [PointGrayResearch b][Viewplus c] は、ステレオビジョン用の統合システムである。

[1] システム構成

このシステムは 3 眼が本体に固定されている特殊カメラユニットと、IEEE1394 インタフェース、処理用のソフトウェアから構成されている。撮影する画像視野内部に存在するオブジェクトに対して、最高 24 フレーム／秒の速度で距離を測定する。また、測定した情報を用いるための API や、リアルタイムにテクスチャマッピングを行って表示するためのアプリケーションも装備されている。

[2] カメラ性能

本体上の 3 台の CCD カメラには、プログレッシブ・スキャン・フルカラー CCD を採用している。このため運動するオブジェクトを NTSC CCD で撮影したときに起こるインターレースのぶれ(DXC-9000 参照)も回避されている。撮像素子には 1/3 インチの正方画素 CCD が用いられている。

シャッタースピードは 1/25 秒から 1/15000 秒、解像度は 640×480 の VGA サイズである。

[3] 3 次元情報

3 台の CCD カメラが撮影した画像から、サブピクセルレベルでの画像マッチングを行い、3 次元の奥行き情報を抽出するようになっている。この結果は 3 次元の点プロットや、距離関数、テクスチャマッピングを行った画像などの形で表示することができる。3 次元情報の解像度は、計算速度とフレーム周波数にあわせて 160×120, 320×240, 640×480 の三種類から選択することができる。

[4] キャリブレーション

各カメラの光学歪みと位置ずれは、システムレベルで既に校正がかかっている。そのため、ユーザーがソフトウェアレベルでの補正を行う必要が無い。

[5] 入出力

IEEE1394 インタフェースを介して、デジタルデータで画像転送と制御を行う。また、この IEEE1394 ケーブルを直列接続することで、複数のユニットを同期して動作させることも可能となっている。

[6] ソフトウェア

ソフトウェアパッケージは Windows98SE, Windows2000, Linux の各オペレーティングシステムに対応している。3 次元計測したデータに対して各種の処理を行うための API 関数が提供されており、Microsoft 社の統合開発環境 Visual C++などから呼び出してユーザーアプリケーションの機能として利用することができる。

[7] その他

カメラ部分の外形寸法は 155(H)×155(W)×50(D)mm であり、重量は 500g である。

(2. 2. 3. 5) SP-D22L

C-BEL 社の開発したスーパープリセットドームカメラ SP-D22L [cbel a][cbel b] を監視システムの実験用カメラとして選定した。

[1] 回転型監視カメラ

このカメラのボディ形状はドーム型をしており、垂直方向に刻まれた太目のスリット内部に 0.25inch の CCD センサが設置されている。カメラの焦点距離は 3.9mm～85.6mm であり、実効水平画角は 54.3° から 2.7° まで変化する。

ドーム全体は水平方向に 360° 回転可能であり、スリット内部での水平方向から垂直方向まで 90° の回転とあわせて、水平面上のすべての視野範囲をカメラによって撮影することができる。

また、ズーム機能も備えており、焦点距離の調整による光学ズーム 22 倍のほか、デジタルズーム 2 倍の制御によって、遠距離の物体や、細部の映像も調査することができる。

店舗や施設内の監視用に設計されており、専用カバーなどの利用により、屋外、室内を問わない設置が可能である。

[2] カメラ特性

出力は NTSC のインターレースビデオ信号であり、有効画素数は、水平方向 768 画素、垂直方向 494 画素となっている。

[3] 外部からの制御

RS-485 インタフェースを通じて、外部からカメラの制御が可能となっている。制御内容には、パン、チルト、ズーム、フォーカスの操作と、カメラ位置情報の記憶と再現が含まれる。旋回の速度は水平方向に $2^{\circ} \sim 300^{\circ}$ /秒、垂直方向に $1^{\circ} \sim 150^{\circ}$ /秒となっている。

[4] その他

本体の寸法は 150(W)×186(H)×150(D)mm、重量 1.9kg である。

(2. 3) 画像処理ボードの選定

汎用 PC にカメラ（特にアナログカメラ）からの入力を行う場合には、専用のインターフェースが必要となることが多い。この入力インターフェースのうち、リアルタイムの画像処理に用いるために、入力画像を直接システムメモリに転送するものは一般にフレームグラバーと呼ばれる。

このグラバーを用いて入力された画像に対して、毎フレームリアルタイムで画像処理を行う必要がある。このとき、画像処理を行うプロセスについて 2 種類のアプローチが存在する。ひとつは専用のハードウェアによって画像処理を行う方法、もうひとつはソフトウェアで画像処理を行うものである。

前者のメリットは、高速処理が可能な点にある。特に画像の各画素の処理に関連性がない場合やローカルな関連性だけが存在する場合には、並列的に処理を行うことができるため、しばしばハードウェア化による高速化が目覚ましい効果を挙げる。外部プロセッサにこれらの基本作業を任せることで、PC 自体の処理能力を別の計算処理に割くこともできるようになる。また、近年の性能向上が著しい Graphic Accelerator の中には、ポリゴンの描画処理に限らない並列処理能力を搭載したものもある。このような処理能力の応用例としては技術文書 [PixelShader] での画像処理に関する操作手法などがあげられる。

一方後者のメリットは、ソフトウェア処理の特性である汎用性である。たとえば、画像処理のアルゴリズムが複雑なものである場合や、画像内のオブジェクトを認識するなどローカル処理では不可能な計算を行う場合には、単純かつ典型的な単純な繰り返し計算に特化したハードウェアでは対応できない場合も多い。また、近年では PC の汎用計算プロセッサ(CPU)は性能の向上率が極めて高いので、数世代前に開発された専用プロセッサを用いたハードウェアシステムよりも、ソフトウェアによる計算手法のほうが、処理時間だけを比べるとかえって高速である場合もまれではない。

これらの 2 種類のアプローチを対比し、また相互に補完したシステムの効果を検討するため、2 種類の画像処理機構を選定した。

ハードウェア処理を用いる組み合わせの代表として IP5005BD を用意した。また、ソフトウェア処理を用いる組み合わせとしては、METEOR2-MC/4, MIL と、低価格グラバーボード

である FDM-PCI IV も選定した。

各ハードウェア・ソフトウェアは、現在各分野において用いられているもののうち、代表的な製品である。

(2.3.1) FDM-PCI IV

標準的グラバーボードとして Photron 社の FDM-PCI IV [Photron a][Photron b] を選定した。

[1] 転送データ

このボードは、最大 640×480 の VGA サイズのカラーまたはモノクロ画像を、秒 30 フレームのサンプリング速度で PC のメモリ上に取り込むことができる。使用カラーは RGB 24bit と 15bit から選択する。

[2] 入力方法

NTSC・Y/C 形式の画像入力を受け取る。画像の入力タイミングには外部トリガを利用することができる。

[3] 出力方法

PCI バスを介してシステムメモリへの出力を行う。

Windows95, 98, NT, 2000 に対応し、ドライバソフト・開発用 DLL が提供されている。開発用 DLL は表 2 に挙げる機能を保有する。また、このフレームグラバーでは、ボード上には専用フレームメモリを持たず、システムメモリにリアルタイムにデータを転送する方式をとっている。

表 2 FDM-PCI IV 付属ドライバの機能 (カタログ [Photron b] よりの抜粋による)

初期化	キャプチャの中止
入力解像度の設定	シングルキャプチャ
フレーム数の取得	キャプチャ
チャンネルの取得	キャプチャ状況を返す
カレントフレームの設定	カレントフレームのセーブ
ピクセル読み込み	カレントフレームへのロード

ピクセル書き込み	カレントフレーム消去
領域読み込み	全フレームの消去
領域書き込み	カラー モード設定

(2.3.2) METEOR II MC-4

今回選定した METEOR II [Matrox a][Matrox b] は米 Matrox 社の開発した代表的なグラバー ボードである。

[1] 転送データ

最大 640×480 の VGA サイズのカラーまたはモノクロ画像を、秒 30 フレームのサンプリング速度で PC のメモリ上に取り込むことができる。

[2] 入力方法

モノクロまたは RGB 形式で、インターレース方式およびプログレッシブスキャン方式での画像入力を受け取る。RGB 2 本、または最大でモノクロ 6 本の映像ソースに接続し、これらを切り替えて使用することができる。

画像の入力タイミングには外部トリガを利用して同期、非同期を問わずに入力を行うことができる。

[3] 出力方法

METEOR II MC-4 では PCI バスを介してシステムメモリへの出力をを行う。Windows98 SE, Windows NT, Windows 2000 に対応し、各 OS 用にドライバソフトが提供されている。

ボード上に SGRAM 4MB の画像転送用バッファを持ち、PCI バス転送のサポートに用いられる。

(2.3.3) MIL

Matrox Imaging Library [MIL][Matrox a] は画像入力、処理、解析、表示、圧縮に最適化された Matrox 社の開発したプログラミングライブラリである。前述のフレームグラバー METEOR シリーズではこのライブラリの API を用いてメモリへの取り込みを行う。このほかに様々な画像処理に対応した機能を提供する API が装備されており、マシンビジョンや、医療画像処理、画像の解析といった、各種の画像処理において、柔軟な運用を行うことができる。

このライブラリの基本機能を表 3 に示す。

表 3 MIL ライブライの代表的な画像処理機能（カタログ [Matrox a] からの抜粋による）

基本画像処理	画素間演算、統計処理、フィルタリング、モフォロジ演算、幾何変換、FFT、領域分割、
粒子解析	画像中の粒子のカウント、ラベリング、特徴量抽出
計測	ポイント、エッジ、ストライプの抽出、測定
圧縮・伸張	JPEG、JPEG2000 での画像圧縮、伸張機能
Geometric Model Finder	サーチモデルの探索
パターンマッチング	グレースケール正規化相関の計算
バーコード	バーコード・マトリックスコードの処理
キャリブレーション	レンズ歪み、回転歪み、座標変換など
OCR 処理	フォント読み取り、認識文字の定義など
カメラオートフォーカス	カメラのモーター制御
アプリケーション制御	エラーチェック、デバッグ機能
データ制御	画像バッファの確保、開放、保存など
表示制御	画像バッファ、またはユーザウィンドウへの画像表示
ディジタイジング	キャプチャボードの制御
グラフィック	画像バッファへの基本描画セット

各 API は DLL を制御できる C 言語や、ActiveX コントロールから呼び出すことでプログラムを行うことができる。また、MMX や SIMD 拡張命令に対応しており、CPU のパフォーマンスを有効に活用することができるようになっている。

(2. 3. 4) IP5005BD

日立製の画像処理ボード IP5005BD [Hitachi b] を、画像取り込み・画像処理双方の機能が搭載されている標準的ボードとして選定した。

この、IP5005BD ボードは NTSC で入力した画像に対して、デジタルデータとしての取り込みを行い、ハードウェア上で画像処理を行うものである。

フレームグラバーは映像の入力のみを行うものなので、画像処理は全て CPU にて行う必要があり、CPU が他の処理に使用されると画像処理時間が変動することになる。一方、このボードのように LSI で固定的な処理を行うと、CPU パワーの占有をおさえることもでき、常に一定のペースで処理が行われるようになる。

このボードは現在、電子機器生産設備における傷検出の装置や、文字認識装置として、広く利用されている。

[1] 画像入出力機能

最大 4 台のカメラが接続可能であり、入力を切り替えて用いる。カラー使用時のカメラの入力信号は YUV の 4:2:2 方式のみ対応している。

また画像演算結果を、モニタ出力として直接表示するためのインターフェースも備えている。

[2] 画像処理機能

画像処理ボード 1 枚使用の場合、 $512 \times 512 \times 8$ ビット $\times 40$ 面(濃淡 2 値兼用)の画像メモリ(10MB)を内部に搭載している。画像間での演算や、積和演算の能力は 73.5MHz(13.6ns/画素)となっている。この画像処理には、文字抽出やノイズ除去などに効果を発揮する 8 段 2 値フィルタと、照明変動時に有効な濃度変換やマスク処理の最大 4 段のパイプライン演算が使用可能である。画像処理機能のために、直線検知など幅広く活用できるハフ変換を支援するハードウェアを内蔵し、画像の回転、拡大、縮小を高速に行うアフィン変換もサポートしている。また、傾きのある処理対象物を認識する際に利用するための斜方投影機構なども備えている。

ボード上のメモリにある画像を PC で用いるために、ビットマップファイルのデータを PCI ボード上の画像メモリに転送する機能や、逆に画像メモリのデータをビットマップファイルへ出力するコマンドもサポートされている。

また、応用アプリケーションとして用いるための、バーコードの読み取り機能や、文字認識機能も装備されている。

5 - 1 - 4 - 3 課題ア-4 に関する研究開発実施内容のまとめ

本年度は、次年度以降に行うマルチカメラによる遠隔監視システムプロトタイプの開発に先立ち、システム全体構想の策定を行った。また、このシステムの実現、ならびに複数

カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術の研究開発に必要となる主要設備の選定を上記報告のとおり行い、その調達を実施した。

5－2 課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

5－2－1 イ－1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

5－2－1－1 はじめに

アクセスネットワークのブロードバンド化に伴い、インターネット接続を含む IP (Internet Protocol) ネットワークサービスは、単に e メールを転送するための手段ではなく、e ビジネス企業やコンテンツ配信業者が、いつでも豊かで魅力的な映像や音声コンテンツを顧客に届けることのできる輸送手段となってきた。

また、一方で、従来電話網により提供してきた双方向通信アプリケーションも、特に、音声チャットや TV 電話、TV 会議など電話網では余り身近ではなかったアプリケーションを含めて、IP ネットワーク上で実現されつつある。

しかし、これらのコンテンツ配信や音声・映像系アプリケーションが十分に快適に動作するためには一定の通信品質がネットワークで保証されている必要があるが、複数のサービスプロバイダを介してエンドシステム間を接続するインターネット上では、End-to-End 間での一貫した通信品質を確保するのは難しいのが現状である。

本研究は、特にアクセス網内に構築されつつあるコンテンツ配信ネットワーク (CDN) でのリアルタイム性アプリケーションに対する通信品質保証を中心に、アクセス網での通信品質制御技術を研究開発するものであり、本研究テーマでは、階層フロー識別型通信品質制御の有効性を評価することを目的としている。

階層フロー識別型通信品質制御は、アプリケーション毎のフローや、ユーザ毎のパケットフローなど複数種のフローを識別し、識別されたそれぞれのフロー毎に帯域制御や優先転送制御を階層的に施すことにより、広帯域ネットワーク内で要求に応じた通信品質を確保するものである。

本年度は、本研究対象の通信品質制御技術で実現するべき機能の方向性を明らかにするため、アプリケーションやネットワークに関する既存技術を調査・整理するとともに、今後検討していく階層フロー識別的方式の基礎検討を行った。また、来年度以降に行う実機実験の設備調達をおこなっている。

また、本研究全体として、本研究の他の研究及び技術に対する位置付けを明らかにするため、特許調査を行った。調査結果を別冊 1 に示す。

5－2－1－2 研究内容

(1) 次世代ネットワークサービスの通信品質制御に対する要求条件の研究

本委託業務では、次世代ネットワークサービスの通信品質制御条件を整理するため、以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行った。

- ①今後要求されるコンテンツ対応の通信品質に関する調査と整理
- ②ネットワークの End-to-End の通信品質制御技術に関する調査と整理
- ③実験設備の調達ならびにネットワーク構築

①では、ネットワークサービスの通信品質の要件項目を調査整理した後、次世代ネットワークで主流になると予想される、映像配信（伝送）システム、IP 電話システム、TV 会議システムの仕様及びシステム品質要件について調査し、調査結果を元に、今後のコンテンツ対応の通信品質要件について検討した。

②では、ネットワークで現状使用されている、または、検討されている品質制御技術について調査整理した。具体的には、エンドホスト上及び中継ノードに実装される品質制御機能について、プロトコル技術、パケット制御技術を中心に調査、整理した。

③では、本研究で開発する通信品質制御機能、及び管理技術を評価、検証するための実験設備の調達及びネットワーク構築を行った。

(1. 1) 今後要求されるコンテンツ対応の通信品質に関する調査と整理

ネットワークサービスの通信品質は、サービス使用者の満足度を表すサービス品質” Quality of Service (QoS)” の指標の一部分として捉えられてる。

QoS の定義およびフレームワークは、多数の研究や、標準化作業において検討、定義されている[CCITT 1989],[ISO], [Campbell 1998]。これらの文献での QoS の概念には、イベント発生の絶対時刻、イベント発生の同時性、データや情報のスループット、処理容量、データ伝達の正確性、制御の正確性、安全性、信頼性、セキュリティ等に分類される QoS パラメータが含まれ、サービス品質” QoS” とは非常に多面的であるといえる。

本研究では、階層フロー識別型の通信品質制御技術の開発を目指しており、多面的な QoS パラメータのうち、主信号データの伝送品質に関する QoS パラメータに主眼をおいてその要件を整理することが重要であり、以下の調査・検討でも、伝送品質に関する QoS パラメータを中心に言及することとする。なお、コンテンツ要求やネットワーク制御などの制御信号に関する QoS パラメータや、安全性、信頼性、セキュリティに関する QoS パラメータについても、高品位ネットワークの実現のために研究していくことが必要であるが、その分野については今後の他の研究成果に期待することとしたい。

また、一方で、これらの QoS パラメータは、ユーザの視点に立った特性（以下ユーザレベル QoS）、アプリケーションが認識する特性（以下アプリケーションレベル QoS）、エン

ドシステムで認識される特性（以下エンドシステムレベル QoS）、ネットワークサービスプロバイダの視点にたった特性（ネットワークレベル QoS）など、視点毎に分類して考えることができる[若宮 2001],[Hafid 1998]。例えば、音声品質、会話の自然さ、動画の滑らかさ、コンテンツ反応時間、違和感のない画像と音声の同期などは、ユーザが実際に感じる QoS パラメータ（ユーザレベル QoS）、音声サンプリングレート、画像解像度、フレームレート、応答時間などはアプリケーションが認識する QoS パラメータ（アプリケーションレベル QoS）、伝送レート、ジッタ、遅延時間などは、サービスプロバイダが技術的に管理すべき QoS パラメータ（ネットワークレベル QoS）である。

ユーザレベル QoS を定量化するのは困難であるが、音声や映像コンテンツに関しては、主観評価手法による MOS 値 (Mean Opinion Score) [ITU-T 1996] や、客観評価値である PSNR (Peak-Signal to Noise Ratio) [ITU-T 1998 a], PSQM (Perceptual Speech Quality Measurement) [ITU-T 1998 b] が開発されている。

最終的には、ユーザレベル QoS を達成することがシステムの目的であり、本研究でもユーザレベルでの QoS を考慮して研究を行っていくことが重要である。しかし、上記の手法で定量化されたユーザレベル QoS を満たすために、その他のレベルの QoS でどのような条件を満たすべきかは複雑な問題であり、"QoS マッピング" として、様々な検討が行われている[Steinmetz 1996], [若宮 2001]。一般に、QoS マッピングは、コンテンツ・サービスの種類、アプリケーションの種類、エンドホスト一ネットワークサービス間での QoS 機能分担方法、選択する QoS パラメータ等に応じて、個別に検討が必要であり、現状では、一意にマッピングできる手法の確立には至っていない。逆に、実際のシステム運用での実験と調整により適切な方法が確立されていくべきものであると考えられる。

このような状況において、本研究でも、ネットワークのサービス品質が、ユーザレベルの QoS にどのように影響を与えるのかを実験等により評価しつつ、通信品質制御技術を研究開発していく必要がある。そこで、以下の調査では、本研究の目的である超広帯域、超高品质ネットワーク制御技術の恩恵をもっとも大きく享受するであろう音声や映像などのストリーミングメディア配信及び IP 電話、TV 電話、ビデオカンファレンス等のマルチメディアアプリケーションをターゲットとすることとし、それらの仕様、通信品質要件について調査検討した。

（1. 1. 1）伝送品質関連 QoS パラメータの調査

IETF (Internet Engineering Task Force) IPPM WG (IP Performance Metric working group) では、インターネット性能に対するメトリックの定義作業を行っており、そのフレームワークドキュメント[Peterson 1998]と一連の関連 RFC の中で QoS パラメータについて述べている。以下は、本 WG で定義されている QoS パラメータである。

■ 一方方向遅延 (OWD:One-way delay)

送信されたパケットが宛先で完全に受信されるのに必要な時間。それは 2 つの部分の時間から構成される。

- ・パケットの最初のビットが、送信元から宛先に届くまでに必要な時間。パスに沿って通過する受動媒体および能動装置の数と瞬間のネットワーク負荷に関連する。
- ・フレーム内の全てのビットが送信されるのに必要な時間。回線の伝送速度に関連する。

■ 瞬間パケット遅延変動 (ipdv – Instantaneous Packet Delay Variation)

測定ポイント 1 から測定ポイント 2 に、送信される 1 組の IP パケットの一方方向遅延時間の差。主に能動装置内のキュー及びルーティング転送に関連する。

■ 帯域幅 (bandwidth)

同じバスに沿って流れる他のトラヒックから独立して、ユーザが単位時間に宛先へ送信することが継続して許されるビットの総数。ここでは、平均帯域幅をいうが、もっと詳細に最低保証帯域やピーク帯域幅について検討する必要がある。

■ パケットロス (packet loss、 OWPL:One-way packet loss)

送られたパケットが、受信側で受け取られなかつたか、エラーが発生したパケットの数。瞬間的なネットワーク負荷、設備の送信エラーに関連する。

■ MTU (Maximum Transmission Unit)

ネットワークが送信できる最大物理パケットサイズ。MTU より大きいメッセージも送られる前に、より小さなパケットに分割される。

また、同ドキュメントには WAN (Wide Area Network) リンクに対する QoS パラメータの値の範囲についても述べられている。

表 1 IETF IPPM WG での QoS パラメータの範囲と値

	Single value (SV)	Short range	Medium range	Wide range
One-way Delay	Measured value at empty network (baseline)	less than SV + 50 ms	less than SV + 250 ms	less than SV + 10 s
ipdv	Between 0 and the time needed to transmit one full MTU size packet at line speed	25 ms	50 ms	none
Packet loss (%)	null	< 10^-4	< 10^-3	< 0.1
Bandwidth (speed 64Kb/s)	Fixed value Allow for a burst of one MTU packet	n.a.	n.a.	Suggestion for a minimum of one full MTU size packet per second No upper limit

また、ITU-Tでは、IPパケット転送性能パラメータのためのメトリックを定義するためI.380勧告[ITU-T 1999]が制定されている。以下は、その中で定義されているIPパケット転送性能パラメータである。

■ IPパケット転送遅延 (IP packet transfer delay: IPTD)

二つの参照点間でのIPデータグラムの遅延。典型的な値としてはエンド-エンド間遅延や一つのネットワーク間での遅延が考えられる。

- ・平均IPパケット転送遅延 (Mean IP packet transfer delay)

IPパケット転送遅延の算術的平均。

- ・IPパケット遅延変動 (IP packet delay variation:IPDV)

IPパケット転送遅延の変動。この値を知る事により、ストリーミングアプリケーションがバッファのオーバーフローやアンダーフローを避けることができる。また、TCPなどのエラスティックなアプリケーションであっても、不要な再送を避けるために重要である。

■ IPパケット誤り率 (IP packet error ratio :IPER)

全受信パケット中のエラーパケットの割合。

■ IPパケットロス率 (IP packet loss ratio :IPLR)

全送信パケットの内の紛失してしまったパケットの割合。

■ Spurious IP packet rate

一定の時間内の不正IPパケットの量。

また、ITU-T Y.1540, Y.1541草案では、これらのIP転送性能パラメータに対して、QoSクラス別に国際エンドトゥエンドネットワークの性能目標値を規定している。なお、ITU-T Y.1540, Y.1541は現在作成作業中である。表2にITU-T Y.1541で示されるIP性能値を示す。

表2 ITU-T Y.1541(草案)での国際ネットワークで達成されるべきIP性能値

		QoS Classes					
		Class 0	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Class 5 Un-specified
Network Performanc e Parameter		100ms	400ms	100ms	400ms	1 s	U
IPTD		50ms	50ms	U	U	U	U
IPDV		1×10^{-3}	U				
IPLR		1×10^{-4}					U
IPER							U

表内の値は、将来運用経験に基づいて改版されるまで適合の必要はない。U: Unspecified、

表 2において、クラス 0、クラス 1は、VoIP、ビデオ会議などリアルタイムアプリケーションでジッタの影響を考慮すべきアプリケーション、クラス 2、3はインタラクティブ性が必要なトランザクションデータなどアプリケーション、クラス 4は低ロスのみを要求するバルクデータ転送やビデオストリーミングを想定したものである。

以上の調査結果から、本研究で高品質ネットワークを実現するためには、以下のネットワーク QoS パラメータを考慮していくのが、適當と考えられる。

- ①平均パケット転送遅延
- ②パケット遅延変動
- ③パケット誤り率
- ④パケットロス率
- ⑤帯域幅（最低保証帯域、ピーク帯域幅）

上記のクラス毎の性能目標値は、インターネットや、国際間エンドトゥエンドネットワークに対するものであり、精密に適合するべき値ではないが、以下のアプリケーション毎の調査検討結果とともに参考とできるものである。

(1. 1. 2) 映像のコーディング技術の調査

映像コンテンツのストリーミングサービスや TV 電話などを IP ネットワークで行うためには、映像のコーディングが必要である。本項では、現在主に使用されている映像（ビデオ）のコーディング技術の調査を行った。

非圧縮でのデジタル映像の必要帯域を表 3に示す。非圧縮のデジタル映像は、時間軸で一定の帯域を必要とし、インターレース方式の場合で 1／60 秒、ノンインターレースの場合で 1／30 秒毎にフィールドが更新される。

このような、映像データを IP ネットワークで伝送するには、広帯域で遅延変動が小さい通信品質を確保することが必要となる。例えば、文献[勝本 2000]では、D1 映像の IP ネットワークでの転送を行っているが、ネットワークの使用帯域低減、音声トラヒックと画像トラヒックの干渉排除、ネットワーク転送ジッタ（パケット転送遅延）を目的にエンドシステムでの QoS 対策として、それぞれ、D1 アクティブエリアデータのみの転送、音声と画像データを一つのトラヒックとして扱うことのできるマルチ AV フォーマットの採用、1 秒分の受信リングバッファ採用を行っている。しかし、本文献の実験では、他のトラヒックが存在しない専用のネットワーク環境までを前提にしており、将来、このような高品位の映像コンテンツをコンテンツ配信ネットワーク（CDN）などの商用 IP ネットワーク上でリアルタイム配信するという需要が発生した場合には、他トラヒックとの干渉回避（帯域及び遅延時間変動の保証）をネットワークにて行う必要が出てくると考えられる。

表 3 非圧縮デジタル映像の所要帯域

種類	必要帯域	ビデオ
D1	225.3Mbps	コンポーネントビデオ
D2	127Mbps	コンポジットビデオ
ハイビジョン	1.2Gbps	ハイビジョン

また、一方で、現状 IP ネットワークで映像伝送では、その伝送帯域の細さのため、画像圧縮が行われている。代表的な画像符号化標準の特徴を表 4～表 8 に示す。

表 4 ITU-T H.261 符号化方式

項目	内容		記事
勧告名	ITU-T H.261		
制定年	1990 年		
符号化方式	動き補償フレーム間予測+DCT 符号化 (実時間符号化を前提)		
ビデオフォーマット例	CIF	輝度信号(Y):352 画素×288 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 176 画素×144 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	QCIF	輝度信号(Y):176 画素×144 ライン 色差信号(Cb, Cr) : 88 画素×72 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
符号化ビットレート	$p \times 64\text{kbit/s}$ ($p=1 \sim 30$) 可変長符号化(量子化特性、コマ落しによるレート制御可能) 最大符号量制限: 256kbit(1k=1024)/CIF フレーム 64kbit/QCIF フレーム		
伝送路エラー訂正	誤り訂正符号		
適用アプリケーション	テレビ電話、テレビ会議		

表 5 MPEG-1 符号化方式

項目	内容		記事
標準名	ISO/IEC 11172-2		
制定年	1993 年		
符号化方式	双方向動き補償フレーム間予測+DCT 符号化		
ビデオフォーマット例	SIF	輝度信号(Y):360 画素×240(288) ライン 色差信号(Cb,Cr) : 180 画素×180(144) ライン フレームレート 30Hz	
	その他	輝度信号(Y):水平／垂直各 4096 画素まで 色差信号(Cb,Cr) : 輝度信号の 1/2 フレームレート 23.976Hz～60Hz ノンインタレース	
符号化ビットレート	約 1.5Mbit/s、可変長符号化		
適用アプリケーション	蓄積メディア(ビデオ CD)		

表 6 MPEG-2 符号化方式

項目	内容		記事
標準名	ISO/IEC 13818-2		
制定年	1996 年		
符号化方式	双方方向動き補償フレーム間予測+DCT 符号化		
ビデオフォーマット例	LOW (CIF)	輝度信号(Y):352 画素×288 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 176 画素×144 ライン フレームレート 29.97Hz	
	Main	輝度信号(Y):720 画素×480(576)ライン 色差信号(Cb,Cr) : 176 画素×144 ライン フレームレート 29.97(25)Hz	
	High-1440	輝度信号(Y):1440 画素×1080(1152)ライン 色差信号(Cb,Cr) : 720 画素×540(576)ライン フレームレート 30(25)Hz	
	High	輝度信号(Y):1920 画素×1080(1152)ライン 色差信号(Cb,Cr) : 960 画素×540(576)ライン フレームレート 30(25)Hz	
符号化ビットレート	標準テレビ画像 6~10Mbit/s HDTV 画像 約 20Mbit/s		
適用アーリークション	デジタルTV放送、HDTV、DVD		

表 7 ITU-T H.263 符号化方式

項目	内容		記事
標準名	ITU-T H.263		
制定年	1996 年		
符号化方式	双方方向動き補償フレーム間予測+DCT 符号化		
ビデオフォーマット例	CIF	輝度信号(Y):352 画素×288 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 176 画素×144 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	QCIF	輝度信号(Y):176 画素×144 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 88 画素×72 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	sub-QCIF	輝度信号(Y):128 画素×96 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 64 画素×48 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	4CIF	輝度信号(Y):704 画素×576 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 352 画素×288 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	I6CIF	輝度信号(Y):1408 画素×1152 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 704 画素×576 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
符号化ビットレート	10k~2Mbit/s		
適用アーリークション	テレビ電話、テレビ会議		

表 8 MPEG-4 符号化方式

項目	内容		記事
標準名	ISO/IEC 14496		
制定年	2000 年		
符号化方式 ビデオフォーマット例	VO(Video Object 毎)の双方向動き補償フレーム間予測+DCT 符号化		
	CIF	輝度信号(Y):352 画素×288 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 176 画素×144 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	QCIF	輝度信号(Y):176 画素×144 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 88 画素×72 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	sub-QCI F	輝度信号(Y):128 画素×96 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 64 画素×48 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
	4CIF	輝度信号(Y):704 画素×576 ライン 色差信号(Cb,Cr) : 352 画素×288 ライン フレームレート最大 30Hz ノンインタレース	
符号化ピットレート	5kbit/s～10Mbit/s		
適用アプロケーション	放送、ビデオゲーム、遠隔監視、AV DB検索リアルタイムAV 通信(インターネット、モバイル)		

映像が画像圧縮されて伝送される場合に、ネットワークに要求される通信品質は、非圧縮の場合と異なると考えられる。上記のような画像圧縮符号化の特徴は、①可変長符号化であること、②双方向の動き補償フレーム間予測を用いていていること、③圧縮率の変更により伝送レートが調整可能であることが上げられる。

可変長符号化であるということは、瞬時の伝送レートが変動することを示している。最低帯域幅の保証に加えて、ピーク帯域幅についても考慮する必要があり、ネットワーク QoS 若しくはアプリケーション QoS にて対応が必要となる。文献[Fukuda 1997]は、MPEG-2 によって圧縮符号化された映像を一定帯域が保証されたネットワーク上で伝送する場合の、ユーザプレファレンス（ユーザレベル QoS）と必要帯域幅制御方法（アプリケーションレベル QoS）の関係（QoS マッピング）について検討している。一定の帯域幅で映像を継続して伝送するためには、ピークレートに見合っただけの最低帯域幅を確保するか、送信バッファによりスマージングを行う必要がある。スマージングは、送信側にて圧縮率を調整して送信することにより実現され、圧縮率調整のパラメータは、フレームレート、解像度（映像サイズ）、量子化率から選択できる。本文献の検討では、MOS 値評価に一番大きな影響を与えるのは解像度の調整であるとしている。

また、双方向の動き補償フレーム間予測は、前後のフレームとの動き差分情報についてのみ符号化することによって圧縮率を向上させる技術であり、全てのフレーム内情報を含

む I フレームの欠落は、複数のフレームの集合である GOP 内の全フレームの復号化に影響を与える。この特性に注目し、瞬間的に帯域幅が現象する場合などには、I フレーム以外のフレームを優先的に欠落させる技術も検討されている。

以上のようなことから画像圧縮符号化を行った映像データを高品質で配信するためには、配信するためには、ネットワークによる最低帯域保証と高品質を確保したままピークレート変動を抑えるアプリケーションでのスマージング技術が必要であり、さらに、遅延時間の制約によりバッファ量が制限される双方向性アプリケーションや超高品质な転送のためには、ピークレート変動を許容する QoS 制御をネットワーク側で提供することが必要であると考えられる。

(1. 1. 3) 現存ストリーミングアプリケーションの動向調査

次世代ネットワークが具備すべき通信品質要件を検討する上で、既存ネットワーク上で普及しているストリーミングコンテンツ配信アプリケーションが備える技術を調査しておくことは有益である。

表 9は、INTERNETWEEK1999 講演資料[櫻井 1999]等を参考に現在普及しているストリーミングアプリケーションを整理したものである。以前までは、アプリケーション独自の映像符号化方式、音声符号化方式のみをサポートしていたものが多かったが、近年、複数の符号化方式に対応する傾向にある。特にインターネット上でのストリーミング配信では、Microsoft 社の Windows Media と Real Networks 社の Real System による配信が大半を占めるようになってきた。また、これらのアプリケーションでは、映像と音声だけでなく、テキストストリームや Flash ストリームなどの複数のストリームを同期させて表示する機能も実現されている。

表 9 各種ストリーミングアプリケーションの符号化・転送技術

製品・標準名	映像圧縮（符号化方式）	音声圧縮（符号化方式）	トランスポート技術・制御技術
Stream Works	MPEG-1, 2	LBR, MPEG-1(レイヤ II), MPEG-2(レイヤ II)	
Real System (Real Networks 社)	H.263base, フラクタル	ACELP, CELP, Dolby AC-3base (Dolby Net)	RDT RTP+RTCP RTSP, SMIL
VDOLive	独自の圧縮技術 (wavelet 変換)	TwinVQ	
QuickTime (Apple 社)	QuickTime Streaming		RTP RTSP, SDP
Windows Media Player (Microsoft 社)	WAV, AVI, QuickTime, RealVideo 4.0, ASF(Windows Media), VDO, MPEG 1, MPEG 2 他	Real Audio 4.0 MPEG Audio Layer 3 MIDI	MMS
IP/TV ビデオサーバー (Cisco 社)	MPEG4 28k-768kbps H.261 128k-1Mbps MPEG1 500k-1.5Mbps Indeo4.1 1M-1.5Mbps MPEG2 Half D1 2M-3.5Mbps MPEG2 Full D1 3M-6M	PCM, GSM, DVI, TruSpeech 8bit リニア, 16bit リニア, MPEG1 他	

以降では、既存のストリーミングアプリケーションで用いられてる主要な技術について整理する。

■ 可変ビットレート技術

輻輳や他トラヒックの干渉によって刻々と変化するネットワークの状態によって、圧縮符号化率の変更などによって送信側が送信ビットレートを変更する技術である。この技術によってある程度の帯域幅減少まで、中断することなく再生を行うことが出来る[WANG 1999]。

しかし将来の高品位コンテンツ配信を考えた場合、帯域減少時の品質は耐えうるレベルになく、ネットワークの通信品質改善が必要となる課題のひとつである。

■ バッファリング技術

上記の画像圧縮データ等のピーカレート変動を吸収するためのバッファリングに加え、ネットワーク内での転送遅延変動や、帯域幅の瞬間的減少、ネットワーク内でのパケット順序の入れ替わりを補償するためメディアの再生開始前に一定時間のバッファリング（以下プレバッファリングと呼ぶ）を行っている。

次世代ネットワークが、遅延時間変動と平均帯域幅を保証できれば、プレバッファリング時間をギリギリまで縮めても安定した再生を行うことができるようになる。

■ ストリーム（メディア）間同期技術

時間軸上の QoS の一つとして、ストリーム間同期を考えておく必要がある。例えば、映像パケットと音声パケットが異なるネットワーク内遅延時間で受信側に到着した場合、映像と音声が時間的に一致しない現象が発生する。このような問題に対しては多くの研究がなされており、なかでも文献[Steinmetz 1996] では、人間が知覚する品質劣化レベルとメディア間の同期ずれ時間の関係を明らかにしている。例えば、許容される音声と映像の同期ずれ時間は±80ms 程度であると述べている。現在、この問題はほとんどがストリーミングアプリケーションで解決を図っていることが多い。ネットワークにて、このような同期制御を行うためには、アプリケーション毎のストリームやフローを識別し制御する事が必要であるが、ネットワークへの負担が大きくなり、現状では困難であり、大規模なネットワークへの適用も難しいと思われる。本研究でも、本課題は、アプリケーションにて解決すべきこととして、今後の検討をすすめることとしたい。

■ トランスポート技術

ストリーミングアプリケーションが、メディアデータを送信するとき、パケット到達性を保証できる TCP (Transmission Control Protocol) ではなく UDP (User Datagram Protocol) を用いることが多い。UDP プロトコルは、ロスパケットの再送機構やネットワークの輻輳回避機構を持たないが、低遅延で、サーバー側にて自由に流量制限ができるなどの利点を持つ事からストリーミングデータのリアルタイム配信に一般的に用いられるようになっている。但し、ファイアウォールやNATの介在のために UDP が用いられない場合は、TCP

や HTTP が用いられる事もある。

また、インターネットでのリアルタイムデータ伝送プロトコルとして RTP (Real-time Transport Protocol) [Schulzrinne 1996]の標準化が行われている。RTP は、伝送する映像や音声データを分割し、RTP ヘッダをつけ、UDP 上で伝送される。RTP ヘッダには、ペイロードタイプの識別、シーケンス番号、タイムスタンプ等が付与され、ストリームの再生同期や配信監視といった機能を提供する。また、RTP には、RTCP (RTP Control Protocol) とよばれる制御用コンポーネントが付随しており、パケットロスやジッタなどのサービス品質のモニタと継続中セッション参加者情報の転送を行うことが出来る。

RTP のペイロードへの映像や音声データのフォーマッティング方法は、各符号化方法毎に IETF にて標準化されており[Hoffman 1998], [Civanlar 1998], [Turletti 1996], [Zhu 1997]、それぞの符号化の特性に合わせたフォーマットとなっている。

一方で、UDP トラヒックと TCP トラヒックが同じネットワークセグメントに混在する場合、ネットワーク全体の通信品質に影響を与えるものと考えられる。IP ネットワークの基本技術である。TCP は、受信者からのパケット受領確認が届かない場合にパケットを再送し、さらにパケットの損失が発生した場合には、自発的にその送出速度を低下させることによりネットワーク内の輻輳状態の回避を図ってきた。この技術は、現在のインターネットを含む IP ネットワークの中で十分機能しハイパーテキスト転送プロトコル (HTTP) による Web アクセスをはじめとする非リアルタイム系アプリケーションのデータ転送を支えている。

文献[Carpenter 2000]では、このようなネットワーク環境において、送達確認、再送、及び送出速度低下メカニズムをもたない UDP パケットが送受信される、もし、パケット損失率が高ければ、リアルタイムストリームは、大きな遅延やパケットロスにより中断を余儀なくされることを示している。また、送出側は、ネットワークの輻輳を検知することができず、データ送出を続行することによって、輻輳状態を更に悪化させることになるとも述べている。さらに、多量の UDP パケットの流入は、輻輳制御機構を持つ TCP の性能を一方的に劣化させる可能がある。

このような点から、次世代のネットワークにおいては、UDP トラヒックと TCP トラヒックの帯域及び遅延制御を独立して行うことが必要となると考えられる。本研究でも、プロトコル種別によって QoS 制御の内容を変更できるようなシステムを検討していく必要がある。

(1. 1. 4) IP 電話 (VoIP)、TV 電話システムの調査

IP 電話 (Voice over IP: VoIP) や、TV 電話、TV 会議も今後 IP ネットワーク上で利用されるアプリケーションである。本アプリケーションの特徴は、双方向性のリアルタイムアプリケーションであることと、既存の電話サービスや TV 電話 (TV 会議) の置き換えとして利用されるためにユーザから高い品質を要求されることである。

LAN 上での IP 電話および TV 電話に使用されるプロトコルは、ITU-T および IETF にて標準化が行われている（表 10 参照）。ITU-T は、ISDN での TV 電話の標準である H.320 を元に、ITU-T 勧告 H.323[ITU-T 2000] を標準化しており、現状の多くの IP 電話システムや TV 電話システムで利用されている。H.323 は、端末間でのシグナリングや音声および映像符号化方式、トランスポートプロトコルといった IP 電話および TV 電話に必要な勧告類を包括的にまとめている。表 11 は、H.323 が使用するプロトコルスタックである。

H.323 で用いられる呼制御プロトコルは、基本的に電話網での制御信号を元に作られており、呼セッションの確立に時間がかかる点が問題とされている。一方で、IETF は SIP (Session Initiation Protocol) [Handley 1999]を呼制御プロトコルとして標準化しており、前記の理由により H.323 よりも IP ネットワークに親和性が高い SIP が今後の主流になる可能性も高い。

表 10 IP テレビ電話に使用される主なプロトコル

プロトコル名	標準化団体	規定年(最新)
H.323	ITU-T	2000
MGCP	IETF	1999
SIP	IETF	1999

表 11 H.323 のプロトコルスタック

アプロケーション層	音声／映像アプロケーション		端末制御と管理				データアプロケーション	
	音声 G.711 G.722 G.723.1 G.728 G.729	映像 H.261 H.263	H.225.0 RTCP	H.225.0 RAS シグナリング	H.225.0 呼 シグナリング	H.245		
RTP	UDP 低信頼性 トランスポート層				TCP 高信頼性 トランスポート層		T.123	
トランスポート層	ネットワーク層				データリンク層			
ネットワーク層	物理層							

一方、IP電話システムに関する仕様、品質水準に関して、ITU-T、ETSI（欧州電気通信標準化機構）TIPHON プロジェクト、TIA（米国電気通信工業会）において、検討が進められており、また、総務省にて主催された「IP ネットワーク技術に関する研究会」においては、IP ネットワークを用いた音声通信技術、いわゆる VoIP（Voice over IP）技術を用いた電話サービスにおける品質や番号計画など技術的課題について検討され検討結果が報告されている[総務省 2000]。

本報告によると、総合音声伝送品質率（R 値）、エンドトゥエンド遅延、呼損率（接続品質）によって、日本国内での IP 電話の品質を定めることとなる方向である。表 12に本報告に提示されている IP 電話の品質クラス分類を示す。この中で、R 値は、ITU-T G.109 に定義されている総合音声伝送品質の評価尺度であり、図 1 のように E-model とよばれる音声通話の品質設計モデルによってネットワークや端末の品質パラメータから計算されるものである。また、この指標は、端末、ネットワークを含めた全システムでのものであり、ネットワークが単独で満たすべき品質条件は、明確にされていない。

しかし、R 値の算出方法からもわかるように、総合音声伝送品質に影響を与えるネットワーク品質要件は、パケット転送遅延とパケット遅延変動および伝送帯域幅であるといえる。遅延時間の増加は、エコーの認知度を高め、会話の違和感を増大させることによって R 値を低下させる要因となる。また、遅延変動は、受信側端末でジッタバッファアンダフローを発生させパケット損失率を増加させることによって R 値の低下を招く。小さい伝送帯域幅は、低ビットレートのコーデック使用を余儀なくすることによって R 値の低下を招く。

IP 電話システムで遅延を引き起こす要因は、コーデック遅延、端末での送受信バッファ遅延、ネットワーク内でのパケット転送遅延が考えられる。コーデック遅延は、一般に低ビットレートのコーデックほど大きくなる。また、端末での送受信バッファを小さくするためには、できるだけ小パケットを使用し、1 パケットの送受信時間を短くするとともに、ネットワークでのパケット遅延変動を小さく抑え、受信側でのバッファアンダフローを低減する必要がある。現在実用化されている IP 電話システムでは、パケット送出間隔は、約 20ms 程度かそれ以下の場合が多い。仮に、IP 電話システムに要求されるエンドトゥエンド遅延を表 12 のクラス B 相当の 150ms、ネットワークでのパケット遅延変動を表 2 の ClassA 相当の 50ms、送受信でのコーデック遅延を 10ms とすると、ネットワークに要求される伝送遅延 Dn は、

$$D_n [ms] = \text{許容エンドトゥエンド遅延 } 150 [ms] - \text{送受コーデック遅延 } 10 [ms] - \text{パケット化遅延 } 20 [ms] - \text{パケット送出遅延 } 20 [ms] - \text{パケット遅延変動 } 50 [ms] = 50 [ms]$$

である必要がある。端末内での遅延時間は、近年の技術革新により急速に短縮されている。ネットワークでは、できる限り遅延変動が少なくなるよう優先制御等の技術開発が必要である。

表 12 IP 電話の品質クラス分類

	クラス A (固定電話並 ^{注1)}	クラス B (携帯電話並 ^{注1)}	クラス C
総合音声伝送 品質率 (R 値)	> 80	> 70	> 50
エンドトゥエ ンド遅延	< 100ms	< 150ms	< 400ms
呼損率 (接続品質)	≤ 0.15	≤ 0.15	≤ 0.15

注 1：ここでの固定電話並、携帯電話並とは、それぞれの通話品質のうち総合音声伝送品質 (R) に注目した場合を現し、エンドトゥエンド遅延やその他の機能について既存の固定電話並または携帯電話並を求めるものではない。

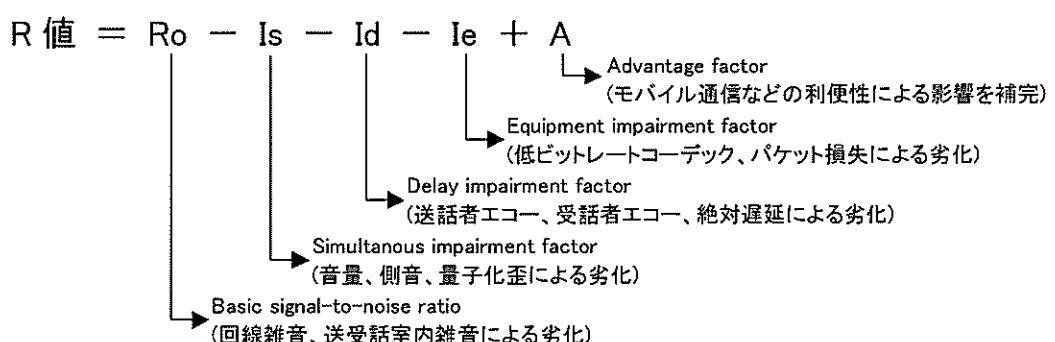


図 1 E-model による R 値の算出方法

一方、TV 電話での映像においても同様に遅延に対する注意が必要であるが、音声ほどリアルタイム性が無くても許容される。これは、TV 電話などのアプリケーションでは、映像は参考的情報であることが多いため、絶対遅延時間以上に音声との同期が重要である。

(1. 1. 3) の調査結果のとおり、音声とのずれが±80ms 程度の誤差は許容されるが、現状のアプリケーションで十分な同期を保つためには、端末において相応のバッファリングが必要となり、音声の遅延を増大させることとなるため、今後の高品質ネットワークでは、音声と同レベルの遅延制御を行うか、ネットワーク輻輳時には、映像の品質を劣化させて映像ストリームよりも音声ストリームを優先する等の制御を検討していく必要があると考えられる。

(1. 2) ネットワークの End-to-End の通信品質制御技術に関する調査と整理

ここでは、現在の IP ネットワークにおいて通信品質を制御するために用いられている技術について網羅的に調査した。パケット通信においては Link-by-Link のパケット転送の繰り返しによって通信が実現されるが、たとえ特定の通信区間だけが高品質であったとしても、

利用者に提供される通信品質には直接結びつかない。通信が行われる経路全体にわたって、ある一定水準以上の条件が整うことで、はじめて利用者にとって意味のある通信品質が提供されることになる。その意味で、Link-by-Link あるいは Hop-by-Hop ではなく、End-to-End の通信品質制御を考えることが重要となる。この場合、End-to-End で共通に存在するレイヤー3から上位の仕組みによる制御によって、下層の差異を吸収あるいは差異に依存しない技術を検討する必要がある。しかしながらネットワーク中の中継ノードによる Link-by-Link のパケット転送の積み重ねにより通信が実現され、その品質の程度が左右されることに変わりは無いため、下位レイヤーの仕組みによる制御および各ノードにおけるパケット転送処理技術を検討することも同様に重要である。さらにはネットワークの設計方針や運用方法によつても、通信品質には大きな違いが出る。そこで、ここではインターネットの設計思想と通信品質に対する考え方、アプリケーション、プロトコルおよびパケット転送処理といった様々な観点から、End-to-End の通信品質実現のために必要となる技術について調査した。その結果、本研究の目標実現に際して考慮すべき事柄や対応すべき規格、および利用を検討すべき技術について明らかとなった。

(1. 2. 1) インターネット QoS の考え方の変化

元来ベストエフォート転送を基本としてきた IP ネットワークは、様々なトラヒック特性を持つ通信アプリケーションに対応するために、サービス品質(Quality of Service : QoS)制御技術を発達させてきた[青山 2000]。これまでには、主にネットワークのスムーズな運用の観点から、ネットワーク管理者側の運用ポリシーに基づいたネットワークリソースの割り当て制御や、割り当てたリソースの効率的な利用方法が検討されてきた。ここでは主にトラヒック特性の違い、すなわちアプリケーション種別や端末特性ごとに、どのような対応をとるべきかが主眼となっている。

最近になって、ブロードバンドの常時接続環境が急速に普及し、個人が商用サービスとしての IP ネットワークを利用する機会が増えている。このような場面では、それぞれの利用者の利用目的や料金に見合ったサービス提供の観点から、個々の利用者の利用契約に基づいたネットワークリソースの割り当て制御も必要となる。すなわち、まずははじめの前提として、各利用者ごとに通信帯域などのネットワークリソースの利用保障を行い、そのうえで運用ポリシーやトラヒック特性に基づいた QoS 制御を行うといった、多層的な QoS 制御技術の実現が不可欠となってくる。

QoS 制御技術は、帯域使用量・伝送遅延時間・遅延変動時間・パケット廃棄率・輻輳回避・輻輳回復を制御する。これらの QoS 制御は、エンドホスト上で行うものと、中継ノード上で行うものに分けられる。インターネットアーキテクチャの基本理念に従えば、中継ノード上では個々の通信コネクションの状態は保持せず、また、ネットワーク内部でのいかなる処理も、エンドホスト上での通信アプリケーションからは極力透過的であるようにすることで、エンドホスト上の通信アプリケーション機能がネットワーク内部の機能に依

存することなく、自由な発展を阻害することのないように注意する必要がある[Carpenter 2000]。

(1. 2. 2) エンドホスト上の機能

IP ネットワークにおいては、もともとネットワークの中継ノード上にはルーティング以外の機能をおかげて、エンドホスト側に機能を配置することで進歩してきた。エンドホスト上の通信プロトコルとアプリケーションソフトウェアの機能により、ネットワークの通信特性や通信状態の変化に応じてうまく対応できるような機能を装備している。ここでの機能の中心は、トータルスループットの向上や幅轍の回避を行うために TCP プロトコルに改良を加えるものと、アプリケーションでデータ伝送フォーマットや送受信処理を工夫するものである。しかしながら、UDP 系のトラヒックからの影響を受けるため、一定の通信条件を維持するには限界がある。また UDP を用いるアプリケーションのトラヒックのコントロールはアプリケーション固有の設計ポリシーに依存するため、ネットワークへのインパクトに関してなんらかの配慮を当てにすることはできない。

(i) 通信プロトコルの工夫

TCP の仕様として RFC793[Postel 1981 a]に規定されているものとしては、設計上の基本メカニズムとして、幅轍回避のためのフロー制御[Jacobson 1988]機能がある。TCP はエンドホスト間であらかじめコネクションを確立して通信を行うためのプロトコルである。送信するパケットに対しては常に送達確認を行い、ビットエラーやパケット紛失が発生した場合には該当パケットの再送を行うことで、上位層のアプリケーションに対してエラーフリーな論理コネクションインターフェースを提供する。この時、再送要求通知が届いたり、ある一定時間を経過しても受領確認パケットを確認できない場合に(タイムアウト再送)、パケットが損失したとみなして再送を行う。パケットの損失はネットワークの幅轍により引き起こされるので、再送が繰り返し必要となる場合には、パケットの送出速度を落とすことで、幅轍状態を悪化させることのないようにするよう RFC2581[Allman 1999]に規定されている。なお、幅轍の検出に関しては、明示的な幅轍通知機能を RFC3168[Ramakrishnan 2001]として仕様化する動きもある。

送出速度の調節は、一度に送出するパケット数を増減することにより行う。通常、パケットの送信時には、ある一定の量までは受領確認パケットの到着を待たずに行う。これをアウトスタンディング伝送方式と呼ぶことがある。送信したパケットに対する受領確認パケットが届くまで、次のパケットの送信を行わずに待っていると、往復の伝送遅延時間(Round Trip Time : RTT)以上の間隔で一パケットしか送信できることになり、スループットが RTT に限定されてしまうことになるためである。この時のある一定量を TCP 受信 Window Size と呼ぶ。実際の実装においては、RTT の評価アルゴリズムと、Window Size の増減のさせ方の違いにより、トータルスループットやグッドプット(送出したパケット総

量のうち正しく届いたパケット量の割合) の違いという形で性能差が生じることになる。

なお、衛星データ通信のように、広帯域だが伝送遅延時間が大きい伝送路や、インターネットへのアクセスに ADSL のような広帯域を用いるが、ネットワークの幅轍やサーバの過負荷などで RTT が大きくなりがちな場合などでは、特に RTT の評価や Window Size の違により、スループット性能に大きな影響が出る。このため、もともとの Window Size の最大値である 64Kbyte を超えた Window Size を用いられるようにしたり、すべてのデータパケットについて RTT を計測する（もともとは Window Sizeあたり一パケットのみ計測する）よう にできるオプション機能が RFC1323[Jacobson 1992]として追加されている。これにより、現在の TCP 受信 Window Size は、通常サイズ(≤ 65535) \times 拡大率(1~ 2^{14})まで最大値を指定することができる。さらに、RTT の急激な増加が起きた場合でも、送信側ホストがその変化をより正確に知ることが可能になり、不要なタイムアウト再送による転送効率の悪化を改善できる。ただし、TCP ヘッダサイズはオプションヘッダ分の 12Byte 増加する。

また、End-to-End の MTU を検出することで、途中でフラグメント化されないように、あらかじめパケットサイズを小さくして送る工夫も RFC1191[Mogul 1990]に定められている。ただし、インターネットの MTU の最小保証値は 576Byte と規定されているので、それ以下のサイズのデータを送る場合には気にする必要はない。

受領確認や再送要求通知を行う際にもいくつかの工夫がある。これらの通知を、通常の送信データがあるときに一緒に送付することで、わざわざ通知のためのパケットを送付しないようにする、ピギーバックや遅延確認がある。また、再送要求通知を行う際に、再送が必要となったパケットからすべてを送りなおす Go-Back-N ではなく、必要なパケットだけ選択的に再送できるようにする選択的再送メカニズムがあり、RFC2018[Mathis 1996]に規定されている。これにより、ネットワークの利用効率を高めたり、スループットの向上を図ることができる。

表 13 プロトコルによる工夫

機能(仕様)	効果
受信 Window Size 制御 (RFC793、2581)(RFC1323)	SlowStart、FastRecovery(RFC2581)による幅轍回避。最大サイズの拡大(RFC1323)。
明示的幅轍通知(RFC3168)	幅轍回避
RTT 精密計測(RFC1323)	不要なタイムアウト再送の減少。Window Size 調整速度のアップ。
アウトスタンディング伝送(RFC793)	スループットの向上
経路 MTU 検出(RFC1191)	フラグメントの防止
ピギーバック(RFC793)	使用帯域とエンドホストの処理を節約
選択的再送(RFC2018)	スループットの向上

(ii) アプリケーションによる工夫

エンドホスト上のアプリケーションソフトウェアでは、特に音声や映像などのリアルタイム性の強いデータを扱う場合に、IP ネットワークがベストエフォートであることを前提とした対応を取っている。リアルタイム性を重視する場合に必要となることは、遅延対策とメディア間同期、およびエラー対策である。

遅延に関しては伝送遅延時間とその変動（ジッター）がアプリケーションに影響を与える要因となる。蓄積型データの再生や、送受信者の間で掛け合いなどの双方向性を必要としないアプリケーションのように、受信データの再生開始までのタイムラグを気にしなくても良い場合には、受信データを一時的にバッファに蓄積してから再生を開始することで、ジッターを吸収することができる。一方、伝送遅延時間自体はネットワークの伝送特性に依存するため、エンドホストが直接コントロールすることはできない。そこで、エンドホスト上の処理遅延の部分を削減することで、アプリケーションから見た End-to-End の遅延時間を短縮する。例えば音声や映像は（1. 1）の項で整理したように、通信環境に合わせて、符号化速度は同じでも符号化処理に要する時間の異なるコーデック手法を使い分けたりすることができる。また、トранSPORTプロトコルについては、送受信処理のオーバーヘッドを小さくするために、UDP を使用することが多い。

高精細映像の符号化規格である MPEG-2 では、利用するメディアに応じて複数の伝送規格が定められている[鈴木 2000]。基本となる圧縮符号化方式である ES (Elementary Stream)、蓄積メディア用の PS (Program Stream)、放送用の TS (Transport Stream)、および Bundled MPEG である。Bundled MPEG は、通常では映像と音声をそれぞれ別々のデータフレームとするところを、映像データに対応する音声データを同一フレームに格納して伝送する規格である。さらにこれらのデータフレームを、IP 網を用いて伝送するためには、IETF でリアルタイムデータ伝送用に標準化されている RTP [Schulzrinne 1996]を用いている。RTP は、ビデオコンファレンスなどのリアルタイムでインターラクティブなアプリケーションでの利用を想定して作られており、シーケンス番号やタイムスタンプなどのヘッダー情報を付加している。さらに、中継ノードが伝送帯域などの違いに応じて符号化方式を変換したり、複数のパケットを一つにまとめたり、通信環境の違いによってマルチキャストをシングルキャストに変更するなどの処理が必要になることを想定し、もともとのデータソースである CSRC (Contributing source)と、加工元となる中継ノードである SSRC (Synchronization source)を識別する情報をヘッダーに付加するようになっている。なお、データを再加工する中継ノード機能のことを、RTP ではミキサー・トランスレータと定義している。また、通信状態のモニターやセッション参加者の識別のために、制御プロトコルである RTCP (RTP Control Protocol) [Schulzrinne 1996]も合わせて定義している。その他にもアプリケーションレベルで伝送の開始や停止および状態の管理を行うためのプロトコルも、RTSP (Real Time Streaming Protocol) [Schulzrinne 1998]として仕様化されている。

RTP ペイロードのデータフォーマットについては、MPEG-2 の各伝送規格に対応して個々

に標準化が行われている。ただしタイムスタンプ値についてはいずれも共通であり、RTP のヘッダーとは別に、90KHz（約 0.01ms）の解像度の情報をデータペイロードの最初のバイトに記録する。RTP ヘッダーのタイムスタンプ値はアプリケーションでは参照しない。ES では、映像と音声は別々の RTP パケットで伝送する。また ES のデータ内部構造であるヘッダーやスライスデータの先頭が RTP ペイロードの先頭に格納されるように分割されて伝送される。ヘッダーやスライスの先頭で区切ることにより、パケットロス時にデータ構造の区切りを検出し易くする狙いがある。PS では特に細かな規定は無く、単にストリームを分割して RTP ヘッダーを付けて伝送するだけとなっている。TS では TS のデータパケット単位に、複数個まとめて RTP ペイロードに格納して伝送する。TS のデータパケットサイズは通常 188 バイトに固定されているため、複数個をまとめて RTP のペイロードに格納することでオーバヘッドを小さくする狙いがある。Bundled MPEG では映像データと音声データを同じパケットにまとめて一緒に伝送する。映像データに関しては ES と同じ方針であり、一つ以上のスライスデータを格納する。音声データは、映像データに付随する音声データを併せて格納するようとする。

トランスポートプロトコルに UDP を使用する場合、確実なパケット転送のために TCP によって実現されていた諸機能は、必要に応じて個々のアプリケーションが実現する必要がある。このうちデータの再送処理によるエラー回復機能については、リアルタイム性の強いデータの場合、再送されてくるデータを待っている余裕が無いことが多い。このため、特に映像伝送の分野ではパケットロスとビットエラーに強い耐性を持つような符号化・復号化方法を用いることで、受信ホスト自身でエラー回復などの対応処理を取れるようにしている。映像符号化技術におけるエラー回復処理の枠組み[福永 2000]は次の 4 段階に分けることができる：(1)エラー検出、(2)エラー局在化(再同期)、(3)エラー隠蔽(コンシールメント)、(4)エラーリフレッシュ。これらの技術は MPEG などの符号化方式に応用されている。

その他に、ビットエラーが起きても受信側でエラーを訂正できるようにするための符号化技術を用いることで、アプリケーションからはビットエラーが無いように見せる FEC (Forward Error Correction) という手法がある。前述の RTP でも FEC をサポートするための仕様[Rosenberg 1999]が定められている。この方法では、あらかじめ元のデータから訂正符号を生成して、受信側に送信することで、エラーの検出と訂正を行う。ただし訂正符号を送信する分、オーバーヘッドが大きくなる。

回線速度が遅い場合には、ヘッダーを差分符号化により圧縮することで使用する帯域を節約する方法もある。ヘッダーの情報はその大半がほとんど変化しないという特徴を利用したものである。これは RTP/UDP を用いる Voice Over IP で利用されることが多い。また PPP を用いる場合にも用いられることが多い。

(1. 2. 3) 中継ノード上の Ingress 機能

ネットワークが QoS を実現するためには、そもそも前提としてネットワークに流入す

るトラヒックがネットワークの転送能力を超えていない必要がある。そのためには、誰がネットワークを利用してよいのか、どのようなサービスを利用してよいのか、どの位利用してよいのかといったことを判断できる必要がある。このような判断に基づいて制御を行うための枠組みを総じてネットワーク受付ポリシーという。このうち誰がネットワークを利用してよいのかを判断して制御する機能をアクセス制御(Access Control)と呼ぶ。また、どのようなサービスをどの位利用してよいのか判断して制御する機能を受付制御(Admission Control)と呼ぶ。狭義の意味での受付制御では、呼制御(signaling)によるネットワークリソースの確保や接続要求を受け入れるか否かの制御(Call Admission Control : CAC)を指すこともあるが、一般的にはネットワークに流入可能なトラヒックの種別やその特性を制御するための機能を指す。このようなネットワーク受付ポリシーはネットワークの入り口であるアクセノードやコア中継ネットワークのエッジノードにおいて実行すべき重要な機能となる。また各ノード上ではパケットの入力時において実行する必要のある機能である。

(i) アクセス制御

アクセス制御を実現するための代表的な仕組としては、TACACS[Finseth 1993]、Kerberos[Kohl 1993]、CAHP (Challenge Handshake Authentication Protocol)[Simpson 1996]、RADIUS (Remote Authentication Dial In User Service) [Rigney 2000], [Zorn 2000]等がある。この他に、特に無線 LAN や広域 LAN サービスでの利用のために策定された仕様に IEEE 802.1X[Jeffree 2001]があり、LAN スイッチのポート利用認証に用いることができる。このうち現在広く用いられているものは RADIUS と CHAP である。CHAP は PPP[Simpson 1994]と共に利用され、リモートアクセスの利用者認証に使われる。RADIUS はクライアントサーバ型の構成で用いられ、アクセノードがクライアントになり、RADIUS がサーバとなる。RADIUS が用いられる理由は利用者の認証に加えて、アクセス受理の際に利用者のプロファイル情報をアクセノードに引き渡すことができるためである。プロファイル情報は RADIUS サーバ自身が直接保持する場合と、他の情報サーバのプロキシーとして機能する場合とが可能である。プロファイル情報には複数の属性値を定義して受け渡すことが可能となっているので、QoS のために様々な条件をユーザー別に初期定義しておいて、中継ノードの設定に用いることが可能である。

(ii) 受付制御

・ Call Admission Control

受付制御は、主に以下に述べる 4 種類の機能の組み合わせによって実現される。第一の機能は呼受付制御(Call Admission Control : CAC)である。IP 網における CAC 機能には、RSVP[Herzog 2000], [Braden 1997] が用いられるが、広域ネットワークにおいては今のところあまり一般的に普及している状況にはなっていない。そもそも IP 網においては CAC 機能自体、あまり用いられてはいないのが現状である。IP 網ではパケットの転送経路はルーティングによって決定されるため、受付制御の機能は主にルータや交換機等のネットワーク機器で実現される。

ィングプロトコルによって常にダイナミックに変化するのが前提となっており、固定的な経路が利用者やアプリケーションに対して割り当てられているわけではない。そのため電話網や ATM などの様に、シグナリングによる経路設定時と開放時、あるいは故障の場合を除いて転送経路の状態が変化しないハードステートを前提とすることはできない。RSVP の場合には常に経路状態が変化するソフトステートを前提とした設計となっている。RSVP では特定の通信経路を設定して通信フローに対して割り当てるのではなく、単にたまたま転送経路となった中継ノードに対してリソースの予約を行う。その後転送経路上の予約状態を保持するために、一定周期で確認メッセージを流す。通信フローの転送経路となった中継ノード上では、通信フローごとにリソースの状態を管理し、一定周期で送られて来る確認メッセージに応じて、現在の状態の保持や変更のための更新処理を行う。この確認メッセージが届かなくなつた時点で、予約状態を解消してリソースを開放する。RFC の規定によれば、確認メッセージの送信周期は通常では 30 秒であり、通信フローごとの状態管理や確認メッセージの処理そのものの処理負担は大きく、特に基幹中継網のルータが対応するのは現実的ではない。

- **Flow Classification**

第二の機能は通信フローの分類(Classification)である。通信フローの分類は、どのようなサービスを、どの位利用することを許すかを判断するための大前提となる機能である。IP 通信の場合、典型的には 5 タップルと呼ばれる、送信元 IP アドレス・宛先 IP アドレス・プロトコル種別・送信元ポート番号・宛先ポート番号の 5 組の情報の組み合わせによって特定することができる、特定の情報を共有するパケット列を一つのフローとみなしている。原理的にはあらゆるヘッダー情報の組み合わせに加えて、場合によってはアプリケーション依存の情報である、Web の URL 情報や cookie を参照することも可能である。QoS の取り組み方のアプローチの一つとして、このフローができるだけ細かく柔軟に定義し、IP 網の全ての中継ノード上において個別のフローごとに異なる取り扱いをすることで、End-to-End の QoS を実現しようとする手法がある。この手法を取った技術に IntServ があった。しかしながら、この手法では、トラヒック量の増大に比例して中継ノード上の通信フロー分類と個々のフロー別の転送処理負担が増すため、基幹中継網はもとより、将来のトラヒック量拡大に対応するのは現実的ではない。

これに対して、中継ノード上でのパケット転送の取り扱いを個別のフローごとに変えるのではなく、必要となる通信品質が似たような通信フローを一つの品質クラスとして一まとめに分類し、品質クラスごとに中継ノード上でのパケット転送の取り扱い方を決めておくアプローチがある。この手法を用いる場合、フローを細かく定義して分類し、特定の品質クラスに割り当てておく処理は、最低でもネットワークの入り口一箇所だけで行えばよい。その他の中継ノード上では通信フローを分類して個々のフロー別に異なる処理をする必要はないため、処理負担はトラヒック量ではなくて、対応しなければならない品質クラスの

数により決まり、将来のトラヒック量拡大に十分対応することができる。問題となるのは、どれだけ細かく品質クラスを定義しておくことができるかである。

IP バージョン 4 では、当初 8 ビットの TOS (Type Of Service) フィールドが定義され [Postel 1981 b]、パケットの異なる取り扱いを可能にしようとした。しかし、実際には TOS フィールドに対応した製品はほとんど現れず、その解釈の定義も変更が行われ [Almquist 1992]、現在では DSCP (Differentiated Services CodePoint) として再定義されている [Nichols 1998], [Blake 1998]。IP バージョン 6においても、この DSCP を受け継ぐ形で [Deering 1998], [Nichols 1998], [Blake 1998]、8 ビットのトラヒッククラスフィールドが定義されている。これらのフィールド値による品質クラス別の取り扱いを行う手法をとった技術として、5 - 2 - 2 - 2 (1. 1.) で説明する DiffServ がある。

• Policing

第三の機能はポリシング(policing)である。ポリシングは各種のトラヒックに対して実際にどの程度ネットワークリソースを利用させるのかを制御するための機能である。そのために前述の通信フローの分類機能によって、必要に応じてトラヒックを分類し、分類したフローごとにその流量を計測する。さらにその計測結果に基づいてパケットの後々の取り扱い方を変えるために、必要に応じて前述の DSCP やトラヒッククラスフィールド値の再マーキングを行ったり、後述のシェーピング機能によって流量を調整したり、場合によってはパケットの廃棄を行ったりする。これによって、ネットワーク内の状態を常に予測可能な状態に保ち、中継ノードの持つ機能によって制御可能な状態を維持できるようにする。

実際にポリシングを行う際には、分類したトラヒック流量のどのようなパラメータを計測し、どのような基準に基づいて計測結果を用いるのかが問題となる。IP 網では DiffServ との親和性の点から、trTCM (two-rate Three Color Marker) として IETF RFC2698 [Heinanen 1999 b] に規定されている計測方法とその結果に基づくマーキング基準を用いるのが一般的である。trTCM ではトーケンパケット用に設定可能なパラメータを 4 つ使用する。トーケンパケットについては後述のシェーピング機能と併せて説明する。4 つのパラメータとは、PIR (Peak Information Rate)、PBS (Peak Burst Size)、CIR (Committed Information Rate)、および CBS (Committed Burst Size) である。これらのパラメータは peak rate 用のトーケンパケットと committed rate 用のトーケンパケットの二つのトーケンパケットの設定に用いられる。トーケンパケットを二段重ねで用いるデュアルトーケンパケットアルゴリズムを用いることにより、三段階の判定結果を得ることができる。peak rate を超えたものを赤、peak rate を超えていないもののうち committed rate を超えたものを黄、committed rate も超えていないものを緑と分類する。さらに trTCM の動作モードには color-blind mode と color-aware mode の 2 種類の動作モードがある。color-blind mode では現在の計測による判定結果を最終的な結果とみなして、必要に応じて DSCP やトラヒッククラスフィールド値などの再マーキングを行う。color-aware mode では、それらのフィールド値がここで計測する以前にすでに計測され

て色付けされているものとみなし、現在の判定結果がそれより悪くなる場合にのみ再マークetingを行う。悪くなる場合は、緑から黄、黄から赤の場合である。

・ Shaping

第四の機能はシェーピング(shaping)である。シェーピングは、分類したフローによるネットワークリソースの利用量が、あらかじめ認められている範囲内に収まることを保証するように、通信フローのトラヒック特性を強制的に整えるための機能である。矯正可能なトラヒック特性としては、最大バースト長(peak burst size)、最大バーストレート(peak burst rate)、最大情報レート(peak information rate)、平均情報レート(sustainable information rate)などがある。これらのパラメータを制御するための代表的な方式として、リーキーバケットアルゴリズムとトークンバケットアルゴリズムがあり、これらを組み合わせることにより様々な制御を行うことができる。これらのアルゴリズムはポリシングのための計測にも共通に用いられる。

リーキーバケットは、最大バースト長と最大情報レートを規定することができる、比較的単純なアルゴリズムの方式である。バケツの深さを最大バースト長とし、各フローはバケツに入れられ、バケツの底の穴から漏れ出る速度を最大情報レートと見立てるモデルである。この方式ではバースト性のある不規則なトラヒックであっても常に一定速度以下に整えることができる。

トークンバケットでは、バケツの深さが最大バースト長である点は同じだが、各フローはバケツとは別のキュー機構に入れられる。バケツには平均情報レートでトークンが補充されていき、トークンの溜まっている量だけキューからフローを流すことができ、流した分に応じてトークンをバケツから取り出す。このためキューの読み出し機構が備える最大読み出し速度のバーストレートを許容することができる。バースト性の高いフローが多い場合には、リーキーバケット方式に比べて、ネットワークリソースを効率よく利用することができる方式であるといえる。

これらの方はうまく組み合わせて用いることにより、例えばポリシングの例で述べたようにトークンバケットを直列に重ねたデュアルトークンバケットとして使用したり、トークンバケットとリーキーバケットを直列に重ねて用いることで、バーストを許容しつつ、所望のレート以下に利用量を抑えるといったような制限を行うことができる。なおここでモデルとして説明しているバケツやキューは、ポリシングのように単に計測結果に基づいて判定と再マークetingを行うだけであれば、単純な FIFO 機構で一時的にパケットをストアさせて通過させるだけでよい。しかしながら、複雑なレートコントロールを行う場合には後述の各種遅延制御機構と幅輶制御技術を組み合わせて用いることで実現する必要がある。

(1. 2. 4) 中継ノード上の Egress 機能

ノードに入力されたパケットに対して、フロー種別の分類とトラヒック特性の計測および

調整を行った後、パケットを次のノードへ転送する際には、許容される遅延特性およびノードの輻輳状態の違いに応じたパケットの扱いが必要となる。遅延に対しては主に複数本のキューイングメカニズムによって、使用可能な回線帯域をどのように分配するかにより制御され、輻輳に対しては主に廃棄制御および輻輳通知によって制御される。

(iii) キューイング

キューイング技術には基本的な FIFO (First In First Out) をはじめ多数のメカニズムがある。典型的なキューイングメカニズムの例としては FIFO の他に PQ (Priority Queuing)、CQ (Custom Queuing)、WFQ (Weighted Fair Queuing)、CBWFQ (Class Based WFQ) および LLQ (Low Latency Queuing) がある。これらのうち現在のところ、VoIP などのリアルタイム系ストリームを混在させる環境で多く使用されているのは LLQ である。各々の特徴は次のとおりである[砂田 2001]。

PQ は絶対的に優先させるべき通信がはっきりしている場合に用いられる。通常 2 本から 4 本程度の FIFO キューにより構成されることが多く、各キューは異なる優先度を持つ。高い優先度を持つキューにパケットがある場合には、それらをすべて送出するまで全ての送信帯域を独占する、完全優先スケジューリングを行う。

CQ では PQ のような完全優先ではなく、あらかじめキューごとの送出比率を決めておき、一定の送信帯域を確保できるようにするものである。

WFQ は各アプリケーションのデータフローに対して個別のキューを割り当てる。各キューには運用方針や契約条件などに従って重み付けを行う。帯域の分配は、パケットがキューイングされているキューの間で行い、CQ のようにあらかじめ固定的に分配するのではなくため、帯域を無駄なく分配することができる。

CBWFQ では、個々のデータフロー別ではなく、あらかじめ定めたいくつかのクラスにデータフローを分類してクラスごとにキューを割り当てることで、使用するキューの本数を限定したものである。

LLQ は PQ と CBWFQ を組み合わせたものである。入力された各データフローは、優先転送、クラス別転送、ベストエフォート転送に分けられ、各々 PQ、CBQ および WFQ によるキューに割り当てられる。LLQ には様々なバリエーションがあるが、優先転送とクラス別転送には最低帯域を保証しつつ、パケットがキューイングされていないときには帯域を他のキューに割り振ることができるような仕組みを備えたものが多い。

(iv) 輻輳制御

中継ノードが輻輳状態になった場合、すなわちキューに入力されているパケットの量がある閾値を超えたとき、場合によってはキューに入りきらずに溢れたりといった事が起きた場合に備えて、そのような状態から回復したり、さらにはそのような状態になるのを未然に回避するための機能が輻輳制御機能である。輻輳制御機能には、計画的にパケットを廃棄して輻輳状態になるのを予防したり輻輳状態から回復させる廃棄優先制御と、エンドホス

トに対して輻輳が起きていることを明示的に通知することで輻輳状態を緩和しようとする輻輳通知がある。

廃棄優先制御の基本となる機能は、キューに滞留しているパケットの量があらかじめキューに設定された閾値を越えた場合に、前述のポリシング機能によりマーキングされたパケットを廃棄したり、各パケットに対して事前に設定または分類機能により設定された廃棄優先度に基づき、多段に設定された閾値に対応してパケットを廃棄することである。この場合に、廃棄対象となるパケットは閾値を超えたとたんに全て廃棄される。

これに対し、RED (Random Early Detection)という手法では、キューに滞留しているパケットの平均量に応じて廃棄確率を徐々に増加させながら、対象とするパケットをランダムに廃棄する。こうすることで、パケット廃棄がバースト的に起こることで特定のユーザーデータに廃棄が集中するのを防ぐことができると同時に、特に TCP フローを対象とした場合に、輻輳状態が深刻化するのを未然に防ぐことが可能となる。このため IP 網での利用が IETF RFC2309[Braden 1998]により、強く推奨されている機能となっている。

なお廃棄対象の選択に際しては、パケットに設定されている優先度やポリシングによるマーキングを廃棄対象の選択判断に利用することができる。その他にも、廃棄確率の変化のさせ方や、廃棄対象の選択方法の違いにより様々なバリエーションがあり、その効果について盛んに研究が行われている。

輻輳通知については当初、フレームリレーの BECN (Backward Explicit Congestion Notification) や FECN (Forward Explicit Congestion Notification) に習い、ネットワークレイヤー レベルでも同様の機能を実現するために、ICMP ソースクエンチ通知の利用が考えられていた。しかしながら、輻輳時に新たなコントロールパケットを生成しても帯域を消費するだけであり、さらには公平性や効果も無いということで、その利用はまったく推奨されていなかった[Baker 1995]。

これとは別に、最近になり IP ヘッダーと TCP ヘッダー中に明示的輻輳通知(Explicit Congestion Notification : ECN)のためのフラグを立てる仕様が規格化されている [Ramakrishnan 2001]。フラグとして利用する位置は、IP ヘッダーでは DS-Field に続く 2 ビットの予約ビットを CE (Congestion Experienced) フラグとして使用する。TCP ヘッダーでは Code Bit の直前の 6 ビットの予約ビットのうちの 2 ビットを ECE (ECN-Echo) および CWR (Congestion Window Reduced) フラグとして使用する。この方法では、輻輳状態にある中継ノードが、転送する IP パケットの CE フラグを立てる。エンドホストが TCP を用いている場合には、受信側が ECE フラグを立てて送信側に通知し、送信側が Window Size を縮小することで送信量を抑制する。送信側は CWR フラグを立てることで ECE に対応したことを通知し、ECE フラグを下げるることを受信側に要求する。これにより TCP の Window 制御と連動した輻輳制御を実現しようとするものである。この方法を用いれば、RED などによるパケット廃棄によって、間接的に TCP の Window 制御に干渉する前に、エンドホストに対して予防的な措置をとるべきことを知らせることができるので、無駄なパケット廃棄を防ぐ

ことができるメリットが期待できる。

(2) 通信品質制御方式の研究・開発

通信品質制御方式の下記項目について検討を実施した。

- ① 階層フローの定義および検出手段の検討
- ② 階層フロー通信品質制御機能の実装方式案

①では、フロー検出に用いることができる情報を、レイヤー別に整理し、それらを用いた新しい階層フローの定義方法を検討した。

②では、そのような品質制御機能に基づいた、ユーザー間のフェアな帯域分配とフロー種別に基づいた品質制御方式案を検討した。

(2. 1) 階層フローの定義および階層フロー型通信品質制御方式の検討

(1. 2. 3) で整理したように、的確な通信品質制御を実行するためには、通信フローをどのように定義して分類し、QoS 制御のための様々な要素機能をどのように適用させるのかが鍵となる。前述のとおり、IP 網における通信フローの典型的な分類方法では、5 タップルと呼ばれる送信元 IP アドレス・宛先 IP アドレス・プロトコル種別・送信元ポート番号・宛先ポート番号の 5 組の情報の組み合わせによってフローを特定する。これは IP 網においては、IP レイヤーから上位の情報のみが End-to-End で保存され、すべての中継ノード上で共通的に常に一貫して利用できることが保証されている情報だからである。

その一方で、中継ノードの果たすべき役割や重点を置くべき機能は、ネットワーク中の配備位置の違いによって異なるため、必要に応じてリンクレイヤーや物理レイヤーの情報も利用したほうが、より良く実現または実行できる要素機能もある。本テーマが対象とする中継ノードは、イーサネットとレイヤー 2 スイッチによって構成された広域イーサネット網をアクセス網として利用することで、個々のエンドホストの通信フローを基幹 IP 網に収容するための、ネットワークアクセスサーバおよびエッジゲートウェイとしての役割を担う位置に配備されるものである。このためエンドホスト側から基幹網側へと向かう上り方向の通信フローに対しては、アクセス制御、フロー分類、ポリシングおよびシェーピング機能の適用が特に重要となる。また基幹網側からエンドホスト側へと向かう下り方向の通信フローに対しては、遅延制御および輻輳制御機能の適用が特に重要となる。

いずれの場合においても、単にトラヒック特性上の都合やネットワーク運営上の都合だけではなく、個々のネットワーク利用加入者の利用条件・契約条件を意識した取り扱いをすることが重要となる。さらに、CDN (Contents Delivery Network) と Internet といった運用目的の異なるネットワークをアクセス網と接続させるために、使用するネットワークインターフェースの違いを意識するといったような、ネットワークの物理構成に応じた取り扱いをする必要もある。

これらの観点から、通信品質の制御においては加入者別の利用条件を保証したうえで、ア

プリケーションのトラヒック特性に応じた品質制御を行い、さらにネットワーク運営上の運用目的に応じた品質制御を実行可能とする必要がある。ここでいう加入者別の利用条件の保証とは、一定以上の帯域の利用を保証したり、加入者間でアクセス網の帯域を契約条件に応じてフェアに分配したりすることを想定している。このように、複合的な条件を満足する通信品質制御を行うには、一つの目的にあわせて通信フローを分類した上で、同時に他の目的に応じた通信フローの分類も行い、多重的に通信フローを分類していく必要がある。さらには適用する通信品質制御機能毎に、通信フローを再分類する必要がある。このような、多重的かつ多段的に分類された通信フローのことを、ここでは階層フローと定義する。そして階層フローに対応した品質制御を実行することを、階層フロー型通信品質制御と定義する。

ネットワーク利用加入者の利用条件・契約条件を意識した取り扱いをするためには、加入者情報を識別する必要がある。識別の方法は加入者の収容方式により異なるため、今後の検討を進めるにあたりどの方式を前提とすべきかを決める必要がある。収容方式を大別すると、加入者認証に PPP を用いる場合と IEEE802.1X[Jeffree 2001]を用いる場合とに分けられる。PPP を用いる場合にはさらに、PPP で用いる Network Control Protocol の違いにより、IPCP (Internet Protocol Control Protocol) [McGregor 1992],[Bormann2002]方式と BCP (Bridge Control Protocol) [Higashiyama 2000]方式に分けられる。それぞれの方式のプロトコルスタックを図 2、図 3、図 4に示す。

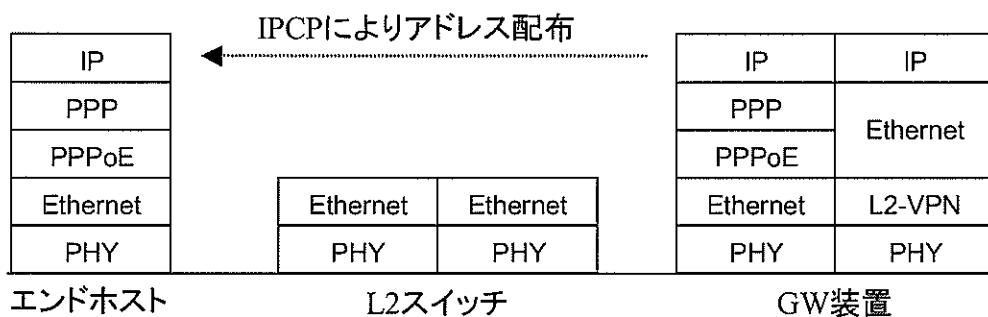


図 2 IPCP 方式

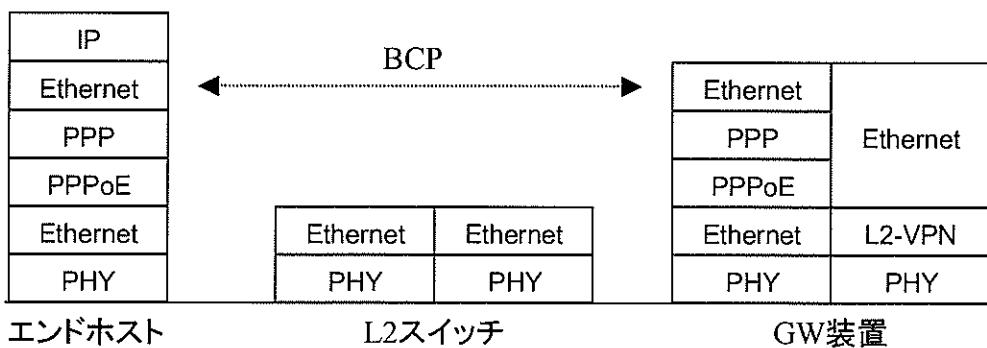


図 3 BCP 方式

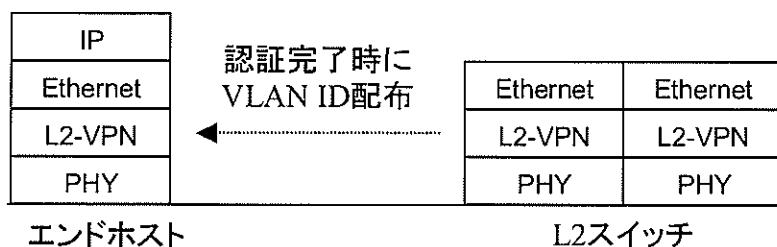


図 4 IEEE802.1X 方式

IPCP 又は BCP を用いる場合にはプロトコルスタックが深く、本テーマが対象とする高臨場感映像の通信を行う場合には転送性能に悪影響を及ぼすと考えられる。IEEE802.1X を用いる場合は IEEE802.1Q tagVLAN [Lidinsky 1998]との相性も良く、LAN スイッチで利用するために作られているため、本テーマの目的に適しているといえる。IEEE802.1X を用いる場合の加入者の識別は、認証時に tagVLAN ID を割り振ることにより行うことが可能である。

以上のことから、通信フローの分類に用いる情報としては、IP から上位のレイヤーによるプロトコルヘッダー情報やアプリケーション固有の、例えば WWW の URL や Cookie などだけではなく、パケットが入出力される回線インターフェースの違い、および Ethernet の VLAN ID を用いる必要がある。

5－2－1－3 他の研究機関における類似研究及び協力関係状況

- TCP のフロー制御技術に関して、特に受信WindowSize 制御の改良提案が活発に行われている。現在は IETF の RFC2581 として、Reno 版の Fast Recovery アルゴリズムまでが採用されて、標準化されるに至っている(M. Allman, V. Paxson, W. Stevens , “TCP Congestion Control”, April 1999, PROPOSED STANDARD)。
- アルゴリズムを改良した NewReno (S. Floyd, T. Henderson, “The NewReno Modification to TCP's Fast Recovery Algorithm”, April 1999, EXPERIMENTAL, <ftp://ftp.isi.edu/in-notes/rfc2582.txt>) や、通信経路の混み具合を推計する Vegas(L. Brakmo

and L. Peterson, "TCP Vegas: End to End Congestion Avoidance on a Global Internet", IEEE Journal on Selected Areas in Communication, Vol 13, No. 8, October 1995, pg. 1465-1480.)、Window Size を 2 分の 1 にせずに Ack の送信タイミングを 2 分の 1 にする Rate Halving(M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, K. Lahey, "The Rate-Halving Algorithm for TCP Congestion Control", Draft, June, 1999.)があるが、いまだ研究段階である。

- ・ 現状で、TCP のフロー制御技術が実際に実装されている状況については
http://www.psc.edu/networking/perf_tune.html に詳しい。
- ・ Queuing 技術に関しては、PQ(Priority Queuing)と CBWFQ (Class Base Weighted Fair Queuing)を組み合わせた、LLQ (Low Latency Queuing)技術が発達しており、DiffServ との親和性も高い。(砂田和洋 "VoIP を現実にする通信インフラ技術－QoS を含む VoIP のためのルーター技術－", 情報処理学会会誌 Vol.42、 No.2 pp.136-140、 2001.2)
- ・ リアルタイム系トラヒックやマルチストリーム同期を意識して、個別パケットの到着期限を考慮した、Dead Line スケジューリング技術が研究されているが、タイムスタンプ値を意識する必要があるため、超広帯域対応の高速処理を行えるまでには至っていない。
- ・ 輻輳回避・回復技術としては、エンドホスト上だけの機能によるものから中継ノード上だけの機能によるものを経て、両者の連携による技術の研究が加速されている。(Gevros, P. et.al."Congestion Control Mechanisms and the Best Effort Service Model", IEEE Network, Vol.15, No.3 pp.16-26, May 2001)
- ・ 主に TCP トラヒックに対して効果がある技術として、WRED (Weighted Random Early Detection)の研究がもっとも活発に行われている。
研究状況については <http://www.icir.org/floyd/red.html> に詳しい。
- ・ UDP トラヒックへの対策として、TCP-Friendly アプローチがあり、UDP を利用するアプリケーションの設計指針および、中継ノード上での UDP パケットの Policing 指針として提案されているが、研究途上である。(Widmer, J. et.al."A Survey on TCP-Friendly Congestion Control", IEEE Network, Vol.15, No.3 pp.28-37, May 2001)

5 – 2 – 1 – 4 まとめと今後の課題

本課題においては本年度、今後 IP 網において必要とされる通信品質制御条件を明らかにするために、ネットワークサービスの通信品質の要件項目を調査・整理した後、次世代ネットワークで主流になると予想される、映像配信（伝送）システム・IP 電話システム・TV 会議システムの仕様及びシステム品質要件について調査した。その結果、QoS 制御の対象となる制御パラメータには多くのものがあることを明確に整理できた。また、輻輳時においてはアプリケーションによってどれを優先的に実現させるのか、トレードオフの関係にあるパラメータも多くあることも明らかになった。

さらに、End-to-End で品質を維持するために、現在実現されている機能を調査した結果、

アプリケーション、プロトコル、中継ノードのそれぞれに、様々な機能が実際に使われており、それらを上手く協調させて連携して用いることが、今後のネットワークにおける QoS 制御の方向であるとの見識を得た。

また、今後、本研究において IP 網における End-to-End の品質制御のための多階層フロー品質制御技術の実験と評価を行うため、レイヤー 2 スイッチ、IP ルーター、管理サーバ設備およびトラヒック付加装置を中心とした評価検証設備を調達した。今後の研究進度に併せ柔軟に機器構成の変更を行いながらも、有効活用を図っていく。

5-2-2 イ-2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

5-2-2-1 はじめに

本研究テーマでは、アクセス網がより安価なイーサネット技術で構成されるようになる次世代ネットワークにおいて、IP レベルのみでなく、イーサネットレベルでの通信品質保証技術を確立することを目的としている。特に、安価な既存のイーサネットスイッチをネットワークシステムレベルで協調動作させることによってネットワーク品質を確保できるような管理・制御技術について研究する。

本年度は、既存のルータ、イーサネットスイッチに用いられる通信品質制御技術の調査及び通信品質に関するネットワーク管理技術の調査を行い、来年度以降の方式検討のための基礎情報の収集を図った。また、来年度以降行う実機実験のための設備調達を行った。

5-2-2-2 研究内容

(1) イーサネットにおける通信品質制御条件の研究

イーサネットにおける通信品質制御条件を整理するため以下の既存技術の調査・整理を行うとともに実験設備の調達ならびにネットワーク構築を行った。

- ①IP ルータにおける通信品質制御技術の調査と整理
- ②イーサスイッチにおける通信品質制御技術の調査と整理
- ③実験設備の調達ならびにネットワーク構築

①では、IP ルータにおける通信品質制御技術としての、包括的なフレームワークについて調査を行い、整理した。②では、イーサスイッチにおける通信品質制御技術として、IEEE での活動状況を調査し、整理した。

さらに現在市販されている製品について、実用化されている技術の調査を行った。

①では、IP ルータにおける通信品質制御技術の種別を調査し、代表的なメーカーの主要な製品における実装状況を整理した。また、IP ルータの主要部品となりつつある、ネットワークプロセッサの製品動向についての調査も行った。②では、イーサスイッチにおける通信品質制御技術の種別を調査し、代表的なメーカーの主要な製品における実装状況を整

理した。

③では、本研究で開発する通信品質制御機能、及び管理技術を評価、検証するための実験設備の調達及びネットワーク構築を行った。

(1. 1) IP ルータにおける通信品質制御技術の調査と整理

(1. 1. 1) IP ルータにおける通信品質制御技術の調査

(i) サービスアーキテクチャ

IP ルータにおける通信品質制御は、5-2-1-2 (1. 2. 3) で整理したように、様々な要素技術の組み合わせにより実現される。これらの機能はネットワーク全体で統一的に機能することによって、はじめて End-to-End で一定水準の通信品質を保証することが可能となる。そのためにはリンクバイリンクで各機能の適用基準や通信フローの取り扱い方が同じになるような、共通のフレームワークに従った動作基準が必要となる。このような目的のために IETF において作成された包括的なサービスアーキテクチャの枠組みに、IntServ[Braden 1994]と DiffServ[Nichols 1998],[Blake 1998],[Heinanen 1999 a],[Jacobson 1999]がある。

IntServ はエンドホスト上の個々のアプリケーションが通信を開始するのに先立って、RSVP [Braden 1997],[Herzog 2000]を用いたシグナリングにより通信バス上の各ノードに帯域を確保することで、通信フロー別の品質制御を実現しようとする方式である。しかしながら 5-2-1-2 (1. 2. 3) (ii) で述べたように、この方式ではスケーラビリティに問題がある。しかも現在では IETF においても、RFC2430[Li 1998]において DiffServ の利用が強く推奨されている。そこで、ここでは DiffServ についてのみ整理することとする。

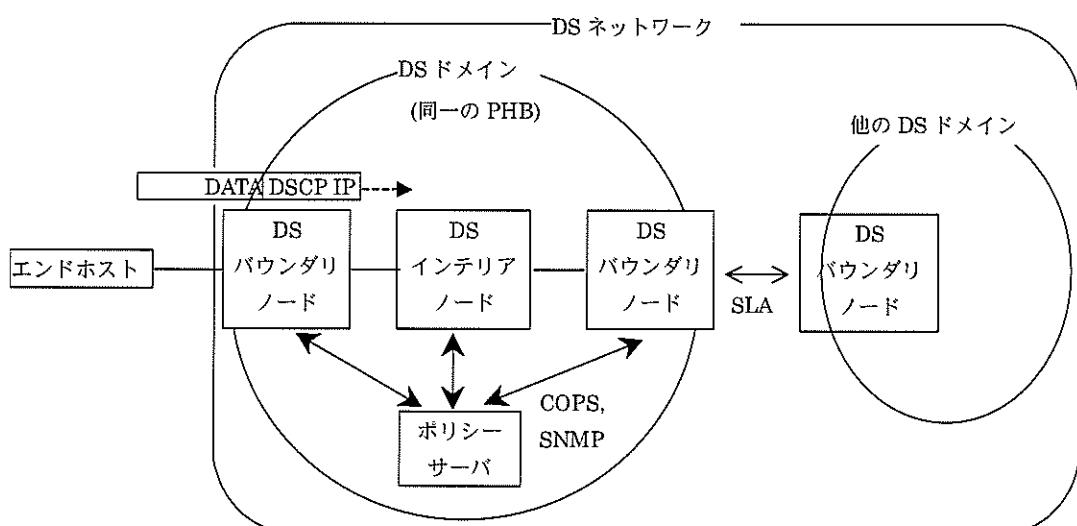


図 5 DiffServ の標準モデル

DiffServ の基本的な考え方は図 5 のモデルに示すように、中継ノードの役割をバウンダリーノードとインテリアノードに分けることにある。フローは、あらかじめ定義されたいいくつかの転送クラスに分類され、それぞれのクラスごとのパケットの取り扱い方針を定義した PHB (Per Hop Behaviour) に従って転送される。この時、フローを各転送クラスに分類するのはバウンダリーノードが行い、DSCP と呼ばれるヘッダー中のフィールド(図 6)に転送クラスを示す値を書き込む。

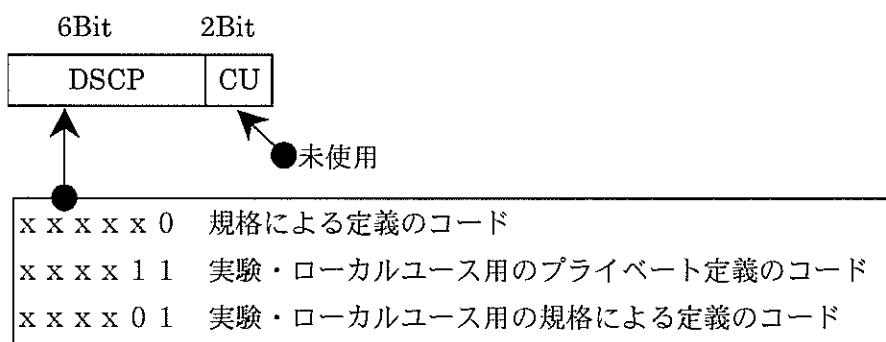


図 6 DS Field

インテリアノードは DSCP の値が示す転送クラスの PHB に従って転送処理を実行する。これにより、コア中継網を構成するインテリアノードでは DSCP を参照する以外の複雑な判断処理を行う必要はなく、遅延制御・幅轍制御といった転送処理に専念すればよいため、スケーラビリティーを確保することができる。一方のバウンダリーノードでは、流入するフローが少ない段階において、フロー分類・ポリシング・マーキング・シェーピングといった複雑な処理を中心に、QoS に関する全ての制御機能を施す役割を担う必要がある。

DiffServにおいてPHBが定められている転送クラスには、EF (Expedited Forwarding)、AF (Assured Forwarding)、および BestEffort の 3 種類がある。EF は遅延に敏感なアプリケーションを想定したクラスで、完全優先転送処理を行うクラスである。AF はそれ以外のアプリケーションに対して相対的な優先転送を実現するためのクラスで、遅延優先度の違いに応じて 4 クラスに分けられ、さらに幅轍時の廃棄優先度の違いに応じて 3 段階に分けられることで、合計 12 クラスの相対的に異なる優先度を持つ転送クラスが定義されている。BestEffort クラスでは、特別な配慮を必要としないトラヒックのための DE: Default PHB、および DiffServ とは互換性の無いマーキングが施されている古い TOS フィールド規約に従っているパケットを扱うための 7 つの CS: Class Selector PHB を扱うことを想定しており、EF および AF に割り当てた残りのリソースを WFQ によって分配する。

各クラスを示す DSCP 値には EF に対して DSCP=1 0 1 1 1 0 が割り当てられており、AF に対しては優先転送 4 クラス × 廃棄優先度 3 クラスとして表 14 に示す値が割り当てられている。BestEffort にたいしては、Default に 0 0 0 0 0 0 (CS0) が割り当てられ、Class

Selector として 0 0 1 0 0 0 (CS1)、0 1 0 0 0 0 (CS2)、0 1 1 0 0 0 (CS3)、1 0 0 0 0 0 (CS4)、1 0 1 0 0 0 (CS5)、1 1 0 0 0 0 (CS6)、および 1 1 1 0 0 0 (CS7) が割り当てられている。

表 14 AF PHB の DSCP

	低廃棄優先度	中廃棄優先度	高廃棄優先度
Class1	0 0 1 0 1 0 (AF 1 1)	0 0 1 1 0 0 (AF 1 2)	0 0 1 1 1 0 (AF 1 3)
Class2	0 1 0 0 1 0 (AF 2 1)	0 1 0 1 0 0 (AF 2 2)	0 1 0 1 1 0 (AF 2 3)
Class3	0 1 1 0 1 0 (AF 3 1)	0 1 1 1 0 0 (AF 3 2)	0 1 1 1 1 0 (AF 3 3)
Class4	1 0 0 0 1 0 (AF 4 1)	1 0 0 1 0 0 (AF 4 2)	1 0 0 1 1 0 (AF 4 3)

ルーターが DiffServ に対応するためには、これらの転送クラスに対応した PHB を実施するためのキューイングメカニズムを実現する必要がある。これには例えば LLQ を用いることで、PQ=EF、CBWFQ=AF、WFQ=BE といった対応付けにより実現することが考えられる。また、AF における複数の廃棄優先度については、trTCM に準じたポリシングを行うことで、有効に活用することが考えられる。

(1. 1. 2) IP ルータにおける通信品質制御技術の実装状況の調査

IP ルータにおける通信品質制御技術の実装状況の調査として、現在市販されている代表的なメーカーの主要製品を対象に、実用化されている技術の調査を行った。代表的なメーカーとして、下記に挙げるシェア上位のメーカーを選択した。

表 15 IP ルータのシェア上位メーカーと代表的な QoS 機能

	Maker	代表製品における通信品質制御技術
(i)	Cisco Systems	CAR, DiffServ, DSCP, CB-WFQ+LLQ, WRED, RSVP, Traffic shaping, ACL
(ii)	Unisphere	CAR, DiffServ, WFQ, 64k-simultaneous queues, Multi-field classification
(iii)	Juniper	DiffServ, WFQ, WRR, RED, RSVP, CoS, Traffic Engineering
(iv)	ENTERASYS	WFQ, PQ, CQ, TOS, 大容量 FIFO
(v)	3Com Corp.	RSVP, DiffServ, PQ, CQ, TOS

(i) Cisco Systems Inc.における通信品質制御技術の実装状況

Cisco のルータは、下記のようなシリーズで構成されている。

- Routers > 80 Gbps(コアルータ)
 - 12400 Series Internet Router
- Routers 79 > X > 10 Gbps
 - 12000 Series Internet Router, ESR 10000
- Routers 9 > X > 1 Gbps
 - 75XX, 7206
- Routers < 0.9 Gbps Legacy Midrange
 - 4XXX
- Routers < 0.9 Gbps Voice- and- Data Midrange
 - 36XX series, 7202, 7204
- Routers < 0.9 Gbps Legacy Low End
 - 26XX series, 17XX series, 1600 (portion sold with WIC), 3810

Cisco の IP ルータは、ルータに搭載されるルータ OS(IOS と呼んでいる)のバージョンによって QoS 機能が異なる。これは、IOS に通信品質制御機能が主に搭載され、ソフト制御で機能を実現しているためと考えられる。代表的なルータである Cisco7500 と IOS のバージョン 11.x と 12.x での搭載機能を下記に抜粋する。

IOS11.x にて実現される通信品質制御技術

- PQ(Priority Queuing)、CQ (Custom Queuing)
- WRED(Weighted Random Early Detection)
- WFQ(Weighted Fair Queuing)
- DWFQ (Distributed Weighted Fair Queuing)、Fair Queuing(FQ)、および QoS グループ DWFQ
 - PBR(Policy Base Routing)、GTS(Generic Traffic Shaping)
 - FRTS(Frame Relay Traffic Shaping)
 - CAR (Committed Access Rate)分類
 - CAR レート制限・RSVP(Resource Reservation Protocol)
 - Compressed Real-Time Protocol(CRTP)
 - Link Fragmentation and Interleaving(LFI)

IOS12.x にて実現される Quality of Service (QoS) 技術

- PQ(Priority Queuing)
- CQ(Custom Queuing)

- WRED (Weighted Random Early Detection)
- WFQ (Weighted Fair Queuing) または、指定のある場合 FQ(Fair Queuing)
- DWFQ(Distributed Weighted Fair Queuing)、 FQ (Fair Queuing)、 および QoS グループ DWFQ
 - CBWFQ(Class Based WFQ)、 MQC (Modular QoS CLI)とポリシングを併用
 - CBWFQ、 MQC と LLQ(Low-Latency Queueing)を併用
 - CBWFQ、 MQC と LLQ + set/match 分類+ RTP+FRTS+ポリシング+シェーピングを併用
 - CBWFQ、 MQC および dTS と dFRTS を併用
 - IP RTP プライオリティ(“PQ+WFQ”)
 - PBR(Policy Base Routing)
 - GTS(Generic Traffic Shaping)
 - FRTS(Frame Relay Traffic Shaping)
 - CAR レート制限
 - WRR(Weighted Round Robin)
 - Class Based QoS Limit 、 Color 、 および Trust 付き
 - 2Q2T / 1P2Q2T
 - COS-DSCP-COS マッピング
 - IP Precedence-DSCP マッピング
 - RSVP(Resource Reservation Protocol)
 - NBAR(Network-Based Application Recognition)
 - CRTP(Compressed Real-Time Protocol)
 - LFI(Link Fragmentation and Interleaving)

それぞれの機能に関して、補足的に説明する。ここでは各機能を、分類・制限・シェーピング・キューイングに分けて整理した。これら 4 種類の説明を挙げると、

- 分類一パケット分類は、トラヒック・フローに IP Precedence 値または DSCP(DiffServ Code Point)値を割り当てる。これをカラリングと呼ぶ。通常、カラリングは、受信トラヒックに対して最初のインターフェイスで適用する。
- 制限一インターフェイスに対する入出力が許されているトラヒック・レート。ルータでは、集約フローに対して制限が定義される。アウト・オブ・プロファイル・トラヒックが廃棄されるか、その優先順位値が引き下げられる。
- シェーピング一トラヒック・レートを円滑化する方法。シェーピングは、送信インターフェイスにおいてのみ定義可能。
- キューイング一幅轍管理および幅轍回避のためにパケットに適用されるスケジューリングおよび廃棄優先順位。カラリングに従ってパケットをキューに入るキューイング方式

もあれば、キューイングの優先順位を指定する必要があるキューイング方式もある。キューイング方式は、QoS プロパティとしてインターフェイスに定義する。キューイング・パラメータは、QoS ポリシーの中で定義する。

また、QoS 実現に向けた方法として、Cisco は下記の条項を紹介している。

- ・インターフェイスにおけるポリシー適用手順
- ・トラヒック・カラリング技術
- ・帯域幅を制御するトラヒック・シェーピング技術またはトラヒック制限技術
- ・送信トラヒックの幅轍管理用キューイング技術
- ・送信トラヒックの幅轍を回避するキューイング技術
- ・音声トラヒックとその他のリアルタイム・トラヒックの管理
- ・アクセス制御によるトラヒック管理
- ・シグナリング技術

・パケットにインターフェイス・ポリシーを実装する手順

手順 1) パケットがインターフェイスに到達すると、インターフェイスは次の順序でパケットに対してポリシーを適用する。通常、最初に入力インターフェイスで適用されるのがカラリング・ポリシーである。ほとんどのインターフェイスでは、定義されているポリシーの検索は、最初に適合したポリシーが検出されると終了する。すなわち、各ポリシーがパケットと比較され、適合したポリシーが検出されると、そのポリシーが適用され、それ以外のポリシーは無視される。カラリング・ポリシーは、必ず使用されるとは限らない。

手順 2) 次に、シェーピング・ポリシーまたは制限ポリシーが適用される。シェーピング・ポリシーと制限ポリシーは、帯域幅をシェーピングまたは制限するために適用される。シェーピング・ポリシーは送信トラヒックだけに適用されるが、制限ポリシーは送信と受信両方のトラヒックに適用される。シェーピング・ポリシーと制限ポリシーを入れ換えることはできない。シェーピング・ポリシーは、トラヒック・フローを指定したレートに円滑化する。制限ポリシーはフローの円滑化を行わないで、制限レートを超えるパケットをすべて廃棄する。シェーピング・ポリシーまたは制限ポリシーは、必ず使用されるとは限らない。

手順 3) パケットがキューイングされる。ポリシーがパケットに適用されると、常にパケットはキューに置かれ、インターフェイスから離れる。その時点で、カラリング・ポリシーがパケットに適用されていたときは、パケットをキューに置く方法に影響がある。シェーピング・ポリシーまたは制限ポリシーが適用されていたときは、パケットに利用できる帯域幅に影響がある。

手順 4) パケットを指定の IP アドレスに送信する。

(ii) Unisphere Networks Inc.

Unisphere のルータは、下記のようなシリーズで構成されている。

- Routers 79 > X > 10 Gbps
 - Unisphere Networks MRX
- Router 9 > X > 1 Gbps
 - Unisphere Networks ERX 1400, 700

Unisphere の QoS 機能実装は、下記のように整理した。

- CAR(Committed Access Rate)
- DiffServ(Differentiated Service)
- WFQ(Weighted Fair Queuing)
- 64k-simultaneous queues (同時キュー数=64,000)の IP の優先制御型 QoS 機能
 - Multi-field classification
 - IP ソースアドレス
 - IP デスティネーションアドレス
 - IP アプリケーションタイプ
 - 加入者インターフェース
 - カスタムマスク

によって分類することが可能である。

専用 ASIC の採用(回線インターフェースごとのフォワーディングやパケット・フィルタリング、バッファ管理、タスクのスケジューリングをハードウェアレベルでサポート)が主な特徴として、あげられる。

(iii) Juniper Networks

Juniper のルータは、下記のようなシリーズで構成されている。

- Routers > 80 Gbps
 - Juniper Networks - M160 Internet Backbone Router
- Routers 79 > X > 10 Gbps
 - Juniper Networks M10, M5

Juniper の QoS 機能実装に関して、下記のように整理した。

- 各ポート毎に 4 つの QoS キュー
- Traffic Engineering として、MPLS をサポート
- Juniper Policy Engine
- 独自開発されたインターネットプロセッサー II (ASIC)

また、ルータの機能としては、ASICによる高速ルーティングを特徴とする。

アーキテクチャとしては、パケット転送機能からルーティング管理やコントロール機能部分を分離したところがポイントになっている。ルーティングエンジンは、FreeBSDをベースにしたカーネルで動作し、ルーティングの管理とシステム機能のコントロールをする。

心臓部はパケットフォワーディング・エンジン(PFE)と呼ばれ、パケット転送のみを高速に実行するハードウェアである。Juniper社開発のASICによって高速フォワーディングを実現しており、百万以上のゲート数のルートルックアップASICのインターネットプロセッサにより、4000万ppsのルックアップレートを可能にしている。また単一フォワーディングテーブルによる管理によるルーティングテーブルとの整合性管理やシングルステージのシェアード・メモリにより高速でかつ信頼性の高いパケットフォワーディング性能を実現した。また、フォワーディングテーブルはパケットのフォワーディングに影響なしにアップデートが可能であるため、ルーティングアップデートの数が多くてもパケットフォワーディング処理には影響を与えないとしている。

Juniper OSは、JUNOSと呼ばれ、ルーティングソフトウェアである。JUNOSは、BGP-4、IS-IS、OSPF、DVMRP、PIMなどを実装している。

(iv) ENTERASYS Networks Inc.

ENTERASYSのルータは、下記のようなシリーズで構成されている。

- Router 9 > X > 1 Gbps
 - Cabletron / Digital DECnis 600
- Router < 0.9 Gbps Legacy Midrange
 - Cabletron / Digital - DECnis 500
- Router < 0.9 Gbps Legacy Low End
 - Cabletron - CSX 200, 400, SSR500 series

ENTERASYSは、Cabletron社からRiverstoneと共に分社したメーカーである。ルータ製品であるSmart Switch Router(SSR)を継承して、取り扱っている。SSRにおけるQoSに関するアウトライインによると、「ポリシー・ベースのトラヒック識別と優先度設定をワイヤスピード・レイヤ4スイッチングと組み合わせる」としている。

主な特徴として、

- カスタムASICによる、トラヒック識別、分類
- プライオリティ付けのポリシーは、ネットワーク全体、ユーザ・グループや特定ホスト間のアプリケーション・フローごとに指定可能
- 大容量バッファ

- ・レイヤ4 フロー・スイッチング
- ・ノンブロッキングのスイッチ・ファブリックを搭載することによるボトルネック解消

があげられる。

QoS 技術の実装に対する考え方としては、「輻輳問題への最初の解答はバッファリング」つまり十分なバッファを搭載することで輻輳回避対策の第一段階とし、次に「遅延とスループットを管制して、優先度の高いトラヒックの要求を満たす」としている。

優先度の分類は、ハードウェアによって、実現するとしている。全トラヒックを4つの優先度クラスに分類するために利用可能なトラヒックの識別情報は、下記の組み合わせである。

- ・ホスト ID
- ・IP アドレス
- ・レイヤ4 プロトコル種別
- ・アプリケーション・ポート番号を含む、レイヤ2(例えば VLAN)、レイヤ3、そしてレイヤ4 情報のソースおよびデスティネーションのコンビネーション

キューの制御としては、下記の技術を実装している。

- ・最高の優先度である Control キューは、ルータの制御トラヒック用に予約
- ・残りの 3 つのキュー(High, Medium, Low)が通常のデータ転送に使用
- ・WFQ(weighted Fair Queuing)により最低限の帯域を保証

(v) 3Com Corp.

3Com のルータは、下記のようなシリーズで構成されている。

- ・Router < 0.9 Gbps Legacy Midrange
 - ・3Com - NETBuilder II
- ・Router < 0.9 Gbps Voice- and- Data Midrange
 - ・3Com - S500
- ・Router < 0.9 Gbps Legacy Low End
 - ・3Com - SuperStack, and OfficeConnect NETBuilder 200, 300, 400, 500, 531
- ・Router < 0.9 Gbps Voice- and- Data Low End
 - ・3Com - SuperStack II RAS 1500, S200
- ・Router < 0.9 Gbps SOHO ISDN
 - ・3Com - OfficeConnect 510, 511, 520, ISDN LANModem

3Com の QoS 機能実装に関して、下記のように整理した。

データの優先順位付けは、トラヒックを High/Medium/Low の送信プライオリティ・キューに振り分る。プロトコル・リザベーションは、特定のプロトコルパケットに対して割当てる帯域を設定し、そのプロトコルが確実に一定の WAN 帯域を使用できるようにする。

RSVP(Resource Reservation Protocol)は、PPP およびフレームリレーのバーチャル・ポート上で、出力側のトラヒックに対し、ダイナミックに QoS を実行する。

表 16 各社の QoS 実装概要表

		Cisco	Nortel	Enterasys	Riverstone
Ingress	呼受付制御 ・ RSVP	○	○		○
	Flow Classification ・ IntServ ・ TOS ・ DSCP ・ DiffServ			○	○
	Policing	○	○	○	○
	Shaping	○	○		○
Egress	Queuing ・ FIFO ・ PQ ・ CQ ・ WFQ ・ CBWFQ ・ LLQ		○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○
	幅轍制御 ・ RED	○			○
	Keyword	IOS	AXC	ASIC 分類	RapidPath

		3Com	Extreme	Unisphere	Foundry
Ingress	呼受付制御 ・ RSVP	○			
	Flow Classification ・ IntServ ・ TOS ・ DSCP ・ DiffServ		○ ○ ○ ○	○ ○	○ ○
	Policing		○	○	○
	Shaping		○	○	
Egress	Queuing ・ FIFO ・ PQ ・ CQ ・ WFQ ・ CBWFQ ・ LLQ		○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○	○ ○ ○ ○ ○ ○ ○
	幅轍制御 ・ RED		○		
	Keyword		L3SW		ASIC QoS

以上、完成製品としてのルータについて各社の状況について整理した。

(1. 2) イーサスイッチにおける通信品質制御技術の調査と整理

(1. 2. 1) イーサスイッチにおける通信品質制御技術の調査

イーサネットは元来通信品質保証に関しては全く考慮されていないため、多くのことは期待できない。もともと狭い範囲で、ファイル転送などのバースト的な通信データを扱うことが想定されていた。しかしながら近年になり、伝送距離および伝送容量の拡大が積極的に図られてイーサネットの利用範囲が徐々に拡大してきている。表 17に見るよう、広域での高信頼な利用を目指した仕様拡張が急速に行われてきているのがわかる。このため LAN だけではなくて、広域イーサネットサービスのように semi-Public 的に利用されるようになってきている。

表 17 IEEE802 LAN の高信頼・高品質化に関する標準化

仕様	標準化年月	概要
802.3x	1997 年 3 月	全二重方式。CSMA/CD を意識することなく、ポイント・ツー・ポイントで接続した 2 台の端末が全二重通信可能。ポーズフレームによるフロー制御を規定。
802.3z	1998 年 6 月	1Gbps 仕様。リンク間最大伝送距離 5Km(1000Base-LX)
802.1p	1998 年 6 月	フレーム優先度。当初は宛先 MAC アドレスや出力先ポートによる転送優先度の制御を規定。その後 802.1Q が規定する VLAN TAG 中の 3 ビットフィールドで優先度を指定。ブリッジ間で属性情報を交換するための GARP プロトコルを規定。
802.1Q	1998 年 12 月	VLAN TAG。フレーム中の 12 ビットフィールドで VLAN ID を指定。ブリッジ間で VLAN 情報を交換する GVRP プロトコルを規定(GARP ベース)。
802.3ad	2000 年 3 月	リンク・アグリゲーション(トランкиング)。複数本の物理リンクを束ねて、仮想的に一本の広帯域なリンクとして利用。
802.1w	2001 年 6 月	高速スパニングツリー。障害発生時に 2 ~ 3 秒で経路切り替え。802.1D の高速版。
802.1X	2001 年 6 月	ポート単位アクセス制御、ユーザー認証。
802.3ae	2002 年(予定)	10Gbps 仕様。リンク間最大伝送距離 40Km (10Gbase-ER 等)
802.3ah	2003 年(予定)	アクセス回線における物理レイヤー拡張。EoCopper(電話線)、EoFiber、EPON 等。
802.1s	2003 年(予定)	多重スパニングツリー。VLAN 毎に独立したスパニングツリーを構築。
802.17	2003 年(予定)	二重リング(RPR: Resilient Packet Ring)により、障害発生時に 50msec 以内で高速経路切り替え。また、通常運用時にも二重経路の帯域全体を利用可能。

一方その用途においても、VoIP や Video-Chat のように品質を重視するアプリケーション

でも十分商用サービスに耐えうる必要が高まりつつある。品質重視の方向性に答えるための仕様としては、輻輳時にフロー制御を可能とするための IEEE 802.3x と、フレームの優先転送を可能とするための IEEE 802.1p および IEEE 802.1q がある。

イーサネットにおける輻輳時のフロー制御は、CSMA/CD によるアクセス制御を前提とした半二重通信の時にはコリジョン信号を意図的に生成することで代用することができた。しかしながら、現在では全二重通信が実現されているため、コリジョン信号自体が無意味なものとなっている。そこで、IEEE 802.3xにおいてイーサネットの全二重化仕様を規定する際に、輻輳制御のためのフロー制御も併せて規定された。ここで規定された方式は、MAC 制御副層において MAC 制御フレームを用いて接続先の機器にデータ送出の停止を要求する輻輳通知を行うものである。輻輳通知に用いる MAC 制御フレームをポーズフレームと呼ぶ。

ポーズフレームは図 7 に示すように、ポーズ専用のマルチキャストアドレスを用いてポーズ時間を指定するデータを送信する。

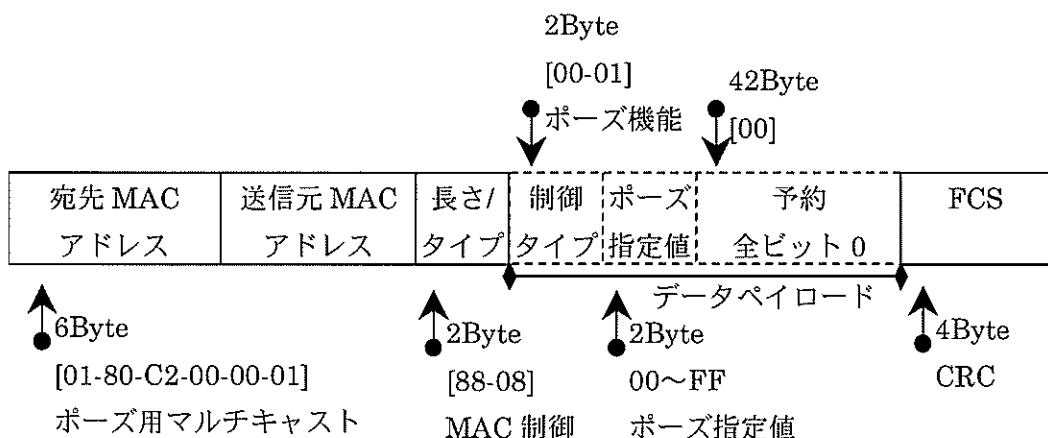


図 7 ポーズフレーム

宛先 MAC アドレスにはポーズ専用のマルチキャストアドレスとして定義されている「01-80-C2-00-00-01」を指定する。長さ／タイプフィールドには MAC 制御を示す「88-08」を指定する。そしてデータフィールド中の最初の 2 バイトに、MAC 制御のうちポーズを表す「00-01」を指定し、続く 2 バイトにポーズ時間を指定する。ポーズ指定値は 0 から 65535 の範囲で指定する。ポーズ時間の単位は 512 ビット時間 × 指定値で、ビット時間とは 1 ビットのデータを送信するのに要する時間である。100M イーサであれば 0.01 マイクロ秒に相当する。ただしこのポーズ時間はギガビットイーサの場合には 2 倍の 1024 ビット時間 × 指定値と規定されており、さらに 10G ビットイーサの場合には 10/100M イーサで規定されている 60 倍の 30720 ビット時間 × 指定値と規定される予定となっている。

イーサネットフレームの優先転送制御は IEEE 802.1p および IEEE 802.1q により規定されている。IEEE 802.1p では各 LAN スイッチが宛先 MAC アドレスや送出先ポート毎にあらかじめ決めておいた優先度やフレーム内の制御情報に基づいて、フレーム転送時に優先制御を行う方式である。このため各 LAN スイッチに対してあらかじめ、どの様なフレームをどの優先度で転送するのかを定義して覚えさせておく必要がある。また全ての LAN スイッチで統一的な取り扱いをするように、共通の設定を行うように留意する必要があった。しかし IEEE 802.1q において優先度を指定するためのフィールドが新たに規定されてからは、この優先度指定に基づいた判断をすれば良いようになった。

IEEE 802.1q では拡張したフレームフォーマットを新たに規格化することで、4 バイト長のタグヘッダーを追加し、ここに優先度を示すフィールドを定義することで優先転送の判断を行うことにしており、この拡張された新たなフレームフォーマットをタグ付き MAC フレームと呼ぶのに対し、従来のフレームフォーマットを基本 MAC フレームと呼ぶ。タグ付き MAC フレームでは図 8 に示すとおり、4 バイトのタグヘッダーのうちの 3 ビットをユーザー優先度として指定するようになっているため、8 段階の優先度指定が可能である。

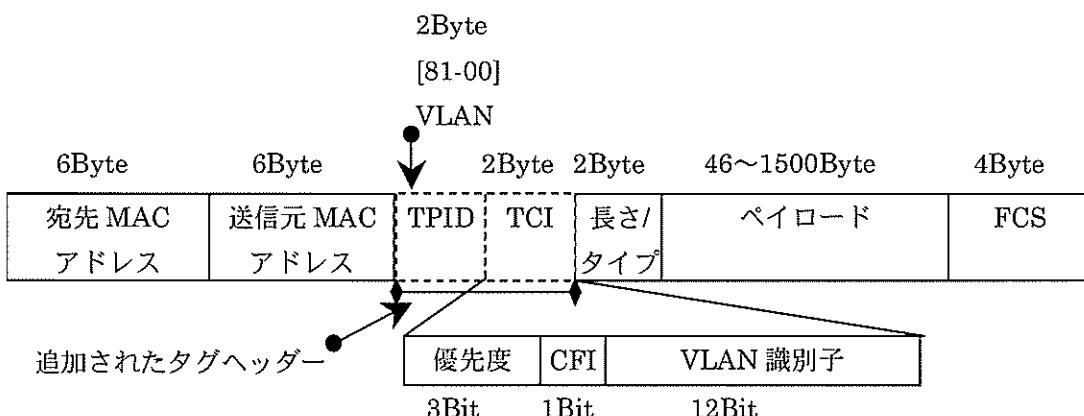


図 8 タグ付き MAC フレーム

タグヘッダーのうち、先頭の 2 バイトを TPID (Tag Protocol ID) と呼び、タグ付き MAC フレームであることを示すプロトコル情報を指定する。値は「81-00」である。続く 2 バイトを TCI (Tag Control Information) と呼び、3 ビットのユーザー優先度と 12 ビットの VLAN の ID を指定する。いずれもデフォルト値は 0 で、それぞれベストエフォートおよび VLAN 指定無しを意味する。VLAN 指定無しを特に、優先度タグ付きフレームと呼ぶ。tagVLAN 認識型のスイッチでは通常の tagVLAN とは区別され、VLAN 機能の実行は行わず、タグ無しフレームと同様に扱われる。1 ビットの CFI は正規形式識別子と呼ばれ、イーサネットの場合には、0 はオプションの埋め込みソースルーティング情報は無く、MAC アドレスはリ

トルインディアン形式であることを示す。1はオプションの埋め込みソースルーティング情報をを持つように拡張されていることを示し、埋め込まれているMACアドレスのインディアン形式はソースルーティング情報のビットにより決まることを示している。なお、8つのレベルの優先度の使用方法はIEEE 802.1pにおいて表 18に示す推奨案が提示されている。

表 18 IEEE 802.1p における優先度使用の推奨案

優先度	トラヒックのタイプ
7 (最高)	ネットワーク管理
6	音声
5	ビデオ
4	制御された負荷
3	エクセレントエフォート型
0 (デフォルト)	ベストエフォート
2	予備 (未定義)
1 (最低)	バックグラウンド

(1. 2. 2) イーサスイッチにおける通信品質制御技術の実装状況の調査
イーサスイッチにおいては、IP ルータの場合と同様に、下記のメーカーを選択した。

表 19 イーサスイッチのシェア上位メーカーと代表的な QoS 機能

	Maker	代表製品における QoS 機能
(i)	Cisco	ACL, WRR, WRED, CAR, IEEE802.1p CoS
(ii)	Nortel	DiffServ, DSCP, IEEE802.1p CoS(8 段階), COPS, Strict Priority, WRR,
(iii)	Enterasys	DiffServ, WFQ, 802.1p
(iv)	Riverstone	DiffServ, WRED, 802.1p, ACL, WFQ, TOS
(v)	Foundry	ACL, WFQ, 802.1p, CoS, ToS

(i) Cisco Systems Inc.

Cisco のイーサネットスイッチは、下記のようなシリーズで構成されている。

- Layer 2 Ethernet Switches
 - Cisco Catalyst 29XX, 35XX, 4000, 5000 and 6000 Series
- Layer 3 Ethernet Switches
 - Cisco Catalyst 2948G-L3, 4908G-L3, 3550, 4000, 6000, 8500 Series
- + Layer 3 Modules
 - Cisco Multilayer Switch Feature Card (MSFC) for Catalyst 6000 Series
- Layer 4/7 Server Load Balancing Ethernet Switches

- Cisco CSS- 11150 Series, CSS- 11800
- + Layer 4/ 7 Server Load Balancing Modules
- Cisco Multilayer Switch Feature Card (MSFC) with SLB code for Catalyst

Catalyst シリーズで実現される機能について、下記に説明する。

ACL(Access Control List) : IP アドレスやポート番号を元に、アクセス制限をかけることが可能。これにより、必要な通信だけを通過させることができる。

PFC2(IOS の ASIC 化) : PFC(Policy Feature Card)は、以前はソフトウェアである IOS が実行してきた機能の一部を、ハードウェア化したもの(ASIC 化)である。PFC は、Supervisor Engine のデータカードとして搭載される。PFC で処理する機能は、IP ユニキャストおよび IP マルチキャストフォワーディング、QoS 、 ACL ルックアップなどがある。PFC2 は、従来の PFC よりさらにパワーアップされ、CEF (Cisco Express Forwarding)に基づくパケットフォワーディングを行う。

その他の機能に関しては、

- WRR (Weighted Round Robin)による複数のキュースケジューリング機能
- WRED (Weighted Random Early Detection)による幅轍の抑制

流入パケットの分類・再分類・ポリシング・マーキングを実行する。つまり、

→共用バッファに格納

→トラヒック・フロー分類

→レイヤ 2 およびレイヤ 3 の QoS フィールドに基づいてポリシーを実行
という流れになる。

また、例えば Catalyst3550 は、ポートごとに 4 つの出力キューをサポートしている。

- WRR (Weighted Round Robin) スケジューリングによる優先制御
- WRED (Weighted Random Early Detection) による幅轍制御
- CAR 機能をサポート
→ユーザトラヒックの転送速度を制限可能
- 128 のネットワークポリシーを設定
- IEEE 802.1p 標準をベースとした CoS (サービスクラス) 値に基づく分類を実行
- ポートベースの優先順位設定
といった QoS 制御をサポートする。

(ii) Nortel Networks Ltd.

Nortel のイーサネットスイッチは、下記のようなシリーズ構成になっている。

- Layer 2 Ethernet Switches
- Nortel Networks Passport 8100, Passport 8600
- Nortel BayStack 70, 350, 420, 450, BPS 2000 Series

- Layer 3 Ethernet Switches
 - Nortel Networks Passport 1200, 8600 Series
- Layer 4/ 7 Server Load Balancing Ethernet Switches
 - Nortel Alteon 18X Series, AceDirector 3/ 4

ここで、NortelにおけるQoS実装技術のうちから、代表的なIPルータ製品であるPassport8000ルーティング・スイッチシリーズへのポリシーサーバからのQoS Policyの適用手順を下記に説明する。

- 1)個々のパケットのIEEE802.1pヘッダやDiffServコードポイント(DSCP)を読み取る
- 2)ポリシーサーバより与えられたポリシーに基づき、DSCPのチェックやマーキングを実行
- 3)ポリシーサーバは、フィルタリングルールをデータベースから取り出す
- 4)ポリシーサーバはCOPSプロトコルを通じて各機器と通信し、フィルタリングルールやキューイングルールを配布する
- 5)コアスイッチやエッジスイッチは、DSCPの変更や再マーキングを行う
- 6)コアスイッチやエッジスイッチは、パケット分類に基づきポリシングやシェーピング、フォワーディングを実行する

上記のような適用形態を参考に、実際のコアルータでのQoS機能を分類する。

Passport8000ルーティングスイッチの主な特徴として、Layer4フィルタリングとQoSを専用ASICにより、ワイヤースピードで実行することを挙げている。専用ASICである、AXC(Accelar eXpress Classification)ASICによってハードウェア処理を実現する。

また、DiffServ機能、Strict Priority, WRR(Weighted Round Robin)の二種類のアルゴリズムでのQoSを特徴としている。

主な、QoS管理機能を下記のように整理した。

- AXC機能
- IEEE802.1p優先処理
- IP ToS(Type of Service)
- IEEE802.1p to DiffServマッピング
- COPS-PR(Common Open Policy Service for Prioritization)**
- COPS for RSVP(Resource Reservation Protocol)
- Passportキューイングおよび優先処理機能
- DiffServ(Differentiated Service)
- コマンドラインインターフェースやDeviceManager(GUIツール)、Optivity Policy Serviceを利用したサービスクラス設定

- ・COPS-PR(Common Open Policy Service Protocol for Provisioning)
- ・IP ToS フィールドによる優先処理
- ・IEEE802.1Q VLAN タギング
- ・IEEE802.1p User Priority セッティング

ここで、AXC ASIC の機能を説明する。Passport8000 ルーティングスイッチでは、独自の AXC ASIC を搭載することで、QoS 管理機能とワイヤースピードのパケットフィルタリング機能を実現。AXC は、RFC2475においてDiffServ 向けに規定されている 2 種類のパケット分類アルゴリズム、BA(Behavior Aggregate)および MF(Multi-Field)の両方をサポートしている。レイヤ 2 および 3、4 レベルの分類が可能で、ヘッダ部分の複数フィールド(もしくは全フィールド)の組み合わせで条件を指定可能となる。

AXC は、以下のフィールドに基づいて MF ベースのパケット分類を実行する。

- ・ソースもしくはデスティネーション MAC アドレス
- ・ソースもしくはデスティネーション IP アドレス
- ・特定範囲の TCP もしくは UDP ポート番号(greater than, less than, equal to, not equal to)
- ・IEEE802.1Q VLAN タグ
- ・DS フィールド(DS フィールドだけを利用して BA ベースの分類を実行)
- ・TCP ACK もしくは RST ビット
- ・ICMP リクエスト
- ・入力ポート単位

AXC では、IP フィルタ機能を利用してパケットの分類を実行する。個々のフィルタには、上記の各内容のいずれか、もしくは全てを合致条件として登録可能である。また、合致条件の中でワイルドカードを使用することも可能となっている。将来的には、アプリケーションレイヤ(レイヤ 7)でのパケット分類も実現する予定としている。

IEEE 802.1p 優先処理：各ポートが備えるハードウェアベースの 8 つの出力キューを利用し、個々のパケットに対して 8 段階の優先順位を適用する。

Diffserv(Differentiated Service)：ハードウェアベースの QoS 管理を実現する。内蔵する IP フィルタ機能と AXC ASIC を利用して、BA および MF ベースのパケット分類を実行し、DiffServ メカニズムをサポートする。

Diffserv to IEEE 802.1p マッピング：入力ポートが受信したパケットが IEEE 802.1Q タグおよび IEEE 802.1p 優先処理ビットを保持している場合、IP レベルで DS フィールドの内容を無視し、それらの情報を優先させるように設定することが可能である。

キューイング及び優先処理機能：個々の出力キューへのパケット割り当ては、WRR(Weighted Round Robin)アルゴリズムにより実施。個々のキューに対して、最大 32 のタイムスロット数を設定可能。8 つのキューそれぞれに一定の重み(パケット送出機会)を設定可能でかつ、全てのポートにおいて、8 つのキューそれぞれのパケット送出タイミングを自

由に設定可能である。

(iii) ENTERASYS Networks Inc.

ENTERASYS のイーサネットスイッチは、下記のようなシリーズ構成になっている。

- Layer 2 Ethernet Switches
 - Enterasys Matrix E5, E6 & E7 Series
 - Enterasys SmartStack Series, Vertical Horizon series
- Layer 3 Ethernet Switches
 - Enterasys Matrix series, X- Pedition series
 - + Enterasys ARM Module for Matrix Series

ケーブルトロン・グループの Enterasys のイーサネットスイッチにおける QoS 機能を下記に説明する。

トラヒック・シェーピング：ポート、プロトコル、およびフロー単位に入出力帯域制限が可能であり、WFQ(Weighted Fair Queuing)をサポートする。

トラヒック制御：アプリケーションレベルでの優先処理、マルチレイヤ・フィルタリング、リンク・アグリゲーション、VLAN 単位のスパニングツリー、および数秒で切り替わり可能な高速スパニングツリーをサポート。

802.1p サポート、ポートあたり 4 キュー、DiffServ サポート、ハードウェアベースのレートリミット、IEEE 802.1D および 802.1Q VLAN サポート、802.3 ad リンクアグリゲーション、マルチレイヤフレームクラシフィケーション、IEEE 802.1X ユーザ認証のサポート。

802.1Q VLAN 標準をフルサポート：プロトコルタイプに従ってトラヒックを特定の VLAN に割り当て、IEEE の GVRP プロトコル（スイッチの VLAN 設定をネットワーク上の他のデバイスに通知する VLAN メッセージングプロトコル）を使用したダイナミック VLAN、個々のポート上の VLAN 出口設定を自動管理する Dynamic Egress をサポート。

802.1p トラヒッククラスを割り当てパラメータは、ポート、IP アドレス、サブネット、UDP または TCP ポート番号である。802.1p プライオリティやレイヤ 2-4 フィールドに基づき DiffServ 値をマッピングする。スイッチに 4 つあるアウトバウンド送信キューのうちの 1 つへマッピング可能。

包括的なアプリケーションベース QoS により、ポートや、IP アドレス、サブネット、および UDP または TCP ポート番号など、レイヤ 2-4 のパラメータに基づいて 802.1p トラヒッククラスを実現する。

(iv) Riverstone Networks Inc.

Riverstone のイーサネットスイッチは、下記のようなシリーズ構成になっている。

- Layer 3

- Riverstone RS Series (2000, 8000, 8600, 3000, 3200, 3800)

リバーストーンの代表的なイーサスイッチ製品である RS38000 における QoS 適用技術を説明する。主な QoS 機能は下記のとおりである。

- アプリケーション・フロー テーブル(max)8,000,000
- 802.1p Priority
- 802.1Q VLANs
- Layer4 フィルタリング
- ACL 行数 20000
- QoS キュー数 4
- WFQ
- TOS/Diff-Serv
- WRED(Weighted Random Early Detection)

基本機能としては、ワイヤースピードの IP ルーティングとポートベース／プロトコルベース VLAN、ローカル・ハードウェア・ルーティング・テーブルを持つ。

アプリケーション・コントロールは、ポート毎の帯域制御、ネットワーク毎の帯域制御、ワイヤースピード・セキュリティ(ACL／レイヤ2 フィルタ)、ワイヤスピード CoS/QoS を実現する。

精度の高いポート毎の帯域制御機能(Inbound/Outbound の帯域を 1K ビットレベルでコントロール可能)により、ハードウェアベースの QoS を実現する。

QoS ポリシーをネットワーク全体に展開し、ユーザグループや特定のアプリケーションに適切なリソース割り当てが可能であり、MPLS による VLL(Virtual Leased Line)、TLS(Transparent LAN Service)のようにトラヒックエンジニアリングをサポートする。

(v) Foundry Networks

Foundry のイーサネットスイッチは、下記のようなシリーズ構成になっている。

- Layer 2 Ethernet Switches
 - Foundry EdgeIron 4802F
- Layer 3 Ethernet Switches
 - Foundry TurboIron, BigIron Series, NetIron Series, FastIron Series
- Layer 4/7 Server Load Balancing Ethernet Switches
 - Foundry Networks ServerIron, BigServerIron

Foundry における代表的な QoS 機能としては、以下があげられる。

- ポートごとに 8 つのレベルのハードウェア QoS キュー

WFQ(Weighted Fair Queuing)、Strict Priority、802.1p キュー・マッピング

- ToS (Type of Service)、IP 優先マッピング、レイヤ2/レイヤ3/レイヤ4 限定トラヒック・フローによるポリシーベースのトラヒック分類(ACL)
- 上記は、ToS、802.1p タグ、DiffServ 設定に基づく優先順位設定と共に、受信ポート、IP 送信元／宛先アドレス、TCP/UDP ポートまたはソケット、MAC アドレス、AppleTalk ソケット番号、VLAN 属性で分類可能

個々のユーザ、サーバ、ポート、または IEEE 802.1p/q VLAN タギングごとに 4 種類の優先順位と IEEE 802.3x 標準フロー制御を付与することで、それぞれのアプリケーションに必要な帯域幅と優先順位を確保する。また、それぞれのモジュールに 4 つの優先出力キューがあり、使用可能な宛先出力ポートに割り当てられる。例えば、BigIron の単一のモジュールは、最大 124 個の優先キューを管理可能。具体的には、24 ポートの 10/100 ボードの場合には、96 の優先キュー（そのモジュール上の他の 23 ポートと CPU 用の 1 ポートの全 24 ポート×4 キュー）と、28 の優先キュー（他の 7 つのモジュール用）を管理可能である。

複数の宛先出力優先キューと出力ポートごとに複数の入力ソース・バッファを組み合わせることにより、下記の双方のヘッド・オブ・ライン・ブロッキングを防止可能としている。

- 混雑している宛先が、他の混雑していない宛先へのデータ・ストリームもすべて停止させて（またはブロックして）しまうため、送信元は、他の混雑していない宛先へのデータの送信を制限
- 宛先が混雑している優先順位の低いパケットが、そのスイッチ・ファブリックを通らなければならぬ優先順位の高いパケットをブロック

1 つの送信元ポートから複数の宛先ポートにデータを転送する場合、同時に使用できる送信元から宛先ポートへの並行パスを複数提供するため、宛先ポートの 1 つが混雑していても他の混雑していない宛先ポートに影響しない。

複数の送信元ポートから 1 つの宛先ポートにデータを転送する場合には、複数の入力ソース・バッファ・ロケーションで「ラウンドロビン」アルゴリズムが作動し、すべての送信元ポートから宛先ポートにパケットを配信可能である。この動作によって、1 つの送信元ポートによって出力ポートが独占されることはない。

(2) イーサネットにおける通信品質制御・管理方式の検討

既存イーサスイッチの通信制御技術の調査結果を受けて、管理装置からイーサネットワークを管理するために必要な、イーサスイッチのリモート制御について、下記項目について検討した。

- ① イーサスイッチ制御方式
- ② イーサネットワーク管理装置の実装方式案

具体的には前項での調査結果に基づき、管理装置からイーサスイッチ制御を実現する為の方式検討を行った。また、イーサネットワークをリモート制御する管理装置の実装方式案を検討した。

上記、(1. 2. 2) の調査結果によると、現時点で販売されているイーサネット用ネットワーク機器に設定可能な QoS 関連機能は、IEEE 802.1Q に規定されている tagVLAN 機能と IEEE 802.1p のプライオリティ付け制御であった。イーサネットワークを介した通信において、End-to-End 間で目標とする通信品質を確保するためには、イーサネットワーク内の各機器が一連となって動作するよう、それぞれの機器にこれらの QoS 機能を、適切に設定管理する必要がある。

(2. 1) イーサスイッチ制御方式の検討

コンピュータシステムやネットワークをある一定の方針に従って設定、制御、管理するのがポリシーベースネットワークと呼ばれる考え方である。ポリシー（方針）は、アクセス制御、QoS、暗号化などネットワークにおける様々な制御・管理のために使用できる。以降では、イーサネットワークでの通信品質制御・管理方式の参考として、QoS 制御に対するポリシーベースネットワークの動向について調査・整理し、本研究で適用すべきイーサネットの制御方式を検討した。

(2. 1. 1) ポリシーフレームワーク

IETF で議論されているポリシーフレームワークは、図 9のようなエレメントから構成されるアーキテクチャを基本としている[Yavatkar 2000]。ポリシーのデータベースであるポリシーリポジトリと、そのポリシーに基づいて決定を下す PDP (Policy Desicion Point)、PDP の判断に従って機器を制御する PEP (Policy Enforcement Point) からなっている。

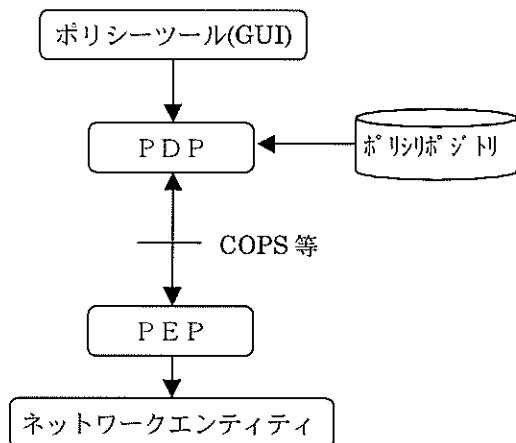


図 9 ポリシーフレームワークのアーキテクチャ

IETF の Policy WG では、このアーキテクチャ上で使用するポリシー・コア情報モデル (Policy Core Information Model:PCIM) [Moore 2001]を DMTF (Desktop Management Task Force) と連携しながら 2001 年に標準化した。このドキュメントは、一般的なポリシー情報を表現するためのオブジェクト指向モデルであるポリシー・コア情報モデルを定義している。PCIM では、構造クラスと関係クラスが定義されており、構造クラスは、ポリシーの情報とポリシーの制御方法を表現し、関係クラスは、構造クラスのインスタンスがどのように関係しているかを表現している。

また、特に QoS に関する情報モデルとして QPIM (QoS Policy Information Model) [Snir] が、Policy WG で標準化が進められている。このモデルは、PCIM 定義の拡張で、DiffServ と RSVP による QoS 機能の対して、抽象的なハイレベルポリシー記述を可能にしている。IPSec など、それ以外のポリシーについては、IETF の各 WG で検討が行われている状況である。

(2. 1. 2) ポリシーの配布プロトコル

上記、フレームワークに従って表現されたポリシーを PDP、PEP 間でやり取るするための配布プロトコルが必要となる。IETF Resource Allocation Protocol (rap) WG では、ポリシーの要求・配布をポリシーサーバー (PDP) 一ネットワーク機器 (PEP) 間で行うための、COPS プロトコル[Boyle 2000 a]を標準化した。SNMP (Simple Network Management Protocol) が MIB (Management Information Base) を情報の基本体系として使用するのと同様に、COPS プロトコルは、PIB (Policy Information Base) によってポリシーの形式を規定している。現在、標準化が進められている PIB の種類としては、Diffserv WG で作業されている Diffserv PIB や IPSec PIB 等がある。

COPS には、その配布の仕方によって 2 つの方式が標準化されている。一つは RSVP を前提とした方法である COPS-RSVP (COPS usage for PRovisioing) [Boyle 2000 b]である。この方式は、エンドユーザやアプリケーションがリソースが必要になった時に、ルータなどの PEP 経由で PDP にリソース等の要求を行うもので、ポリシーに則りリソースの割当が許されれば、PDP は PEP に割当ての可否を指示するものである。本方式により、外部サーバーなどでシステム内のリソース状況を把握した上で、オンデマンドでのリソース割当を行うことが出来る。

もう一つは、Diffserv 等への適用を前提とした方法で COPS-PR (COPS usage for PRovisioning) [Chan 2001]と呼ばれる。この方法は、オペレータが通信に先立って PDP 経由で PEP にポリシーを配布する方法である。例えば、DiffServ は、IP パケットの先頭の TOS ビットのフィールドを、DS フィールドと呼ばれる、配送の優先度や必要とする帯域の大きさを相対的なクラスで表す領域に置きかえ、このクラス付けに沿って QoS 保証を行う技術である。しかし、ネットワーク内の各ルータは、クラス付けされたパケットに対してどのように配送するべきかを理解することが出来ない。ポリシーサーバーは、COPS-PR により、

ネットワーク内で統一したクラスの解釈とパケット配送ポリシーを全ルータに設定することができる。

このように、COPS がポリシー配布プロトコルとして標準化が進められる一方で、IETF SNMP Conf (Configuration Management with SNMP) WG では、SNMP を配布プロトコルとして使おうとしている。既存のプロトコルスタックをそのまま使用できることが理由である。SNMP は、UDP を使用しているため、信頼性が低い点はこの方法の欠点である。

(2. 1. 3) イーサネット制御方式の検討

前述のように COPS と SNMP、更には、現状もっとも一般的である CLI を含め、今後主流となるポリシー配布プロトコルはまだ決定されていない状況であるが、現段階では、COPS によるポリシー配布を行うように研究をすすめるのが妥当であると判断される。また、IEEE 802.1Q tagVLAN 機能や IEEE 802.1p のプライオリティ付けは、DiffServ に類似した QoS 制御技術であり、DiffServ のポリシー設定を前提としている COPS-PR の適用によりイーサネットワーク装置を設定できるようにすることが可能であると考えられる。本研究で課題としているイーサネットワークの通信品質制御・管理のためには、DiffServ のポリシー設定方法を参考として、COPS 及び PIB によりイーサネット制御を行うことも可能であろう。

しかし、前項のフレームワーク作りに関しては、実際のポリシーサーバーの実装に役に立っているとは言えず、End-to-End でのポリシーベースネットワーク実現には、今後、多くの努力が必要な状況にある。

このような中で、イーサネットワークに対して、各 End-to-End 間での一貫した通信品質制御を目指し、上位ポリシーの指定により自動的にネットワーク制御できるようなポリシーベースネットワークを一気に目指すことは、同様に非常に多くの問題に直面することが予想される。

そこで本研究では、IEEE 802.1Q に規定されている tagVLAN 機能と IEEE 802.1p のプライオリティ付けの制御を行うことにより、どの程度の QoS 効果をえられるのか、また、次世代ネットワークでのイーサネットワークの使用用途にあったポリシー設定項目、及び設定値をどのようにすべきかを検討、評価を行い、実環境でのイーサネットのポリシー制御のガイドラインを見極めていくことも重要と考えられる。

(2. 2) イーサスイッチ管理装置の実装方式案

(2. 2. 1) 既存のポリシーマネージャ等の製品概要

ポリシーサーバーやポリシーマネージャとして、各ネットワーク機器の QoS 設定を行う複数の製品がリリースされている。代表的な製品の一覧を文献[INTAP 2001]からの抜粋にて表 20 に紹介する。これからも分かるように、各装置はポリシーの配布方式として COPS、SNMP、CLI など複数の方式を採用できるようになっている。

また、OpenView PolicyXpert では、各メーカー毎に異なるポリシー関連設定項目に対応するため、機種毎に proxy agent を用意し、PolicyXpert からの設定情報を解析し各機器に対応した設定に変換することができるようになっている。

（2．2．2）イーサスイッチ管理装置の実装方式

本委託研究では、今後、イーサネットワークの通信品質制御・管理にて、COPS-PR をポリシー配布プロトコルとして用いることを前提にし、ポリシーサーバーでのポリシー設定項目（PIB 構成）、及びポリシー設定指標を検討するとともに、COPS インタフェースを持たない既存のイーサネット機器にも統一的にポリシー設定が可能なように、上記の PolicyXpert の proxy agent と同様な機能を検討することによって、イーサスイッチ管理装置の実装を検討していく必要がある。

表 20 ポリシーマネージャ製品一覧

製品名	OpenView PolicyXpert	QOS Policy Manager	RealNet Rules Policy Manager	Transcend Policy Server	OrchestraStream Enterprise Edition
開発元	Hewlett-Packard	Cisco Systems	Lucent Technology	3Com	OrchestraStream
対応プラットフォーム	WinNT	WinNT	WinNT,Solaris	WinNT	WinNT,Solaris
出荷時期	99.4Q	99.4	99.3Q	99.4Q	99.4Q
制御対象機器	Cisco,Lucent,Packetia,日立等	自社製品のみ	自社Switch,Cisco ルータ	自社製品のみ	Cisco,Nortel等
配信方法	COPS,CLI	SNMP,CLI,COPS	SNMP,CLI,LDAP,(COPS)	SNMP,COPS	SNMP,CLI
トラヒック管理機能	なし	ActiveDirectory,NDS,Netscape Directory	NDS	ActiveDirectory,NDS,Netscape Directory	なし
備考		別ツール	同社のスイッチモニタリング機能を利用	別ツール	別ツール

製品名	SPECTRUM for Smart Networks	Optivity Policy Services	ExtremeWare Enterprise Manager	ForeView	NetPolicy
開発元	Cabletron Systems	Nortel Networks	Extreme Networks	Fore Systems	ALLOT Communications
対応プラットフォーム	WinNT,UNIX	WinNT,Solaris	WinNT,Solaris	WinNT	WinNT
出荷時期	99.3Q	99.8	99.8	99.4Q	00.1Q
制御対象機器	自社製品他社製品はIEEE802.1Q 対応LAN スイッチ	自社製品,Cisco	自社製品,Cisco,セディア	自社製品のみ	自社製品のみ
配信方法	SNMP	SNMP,CLI,COPS	SNMP,CLI,COPS	SNMP,COPS	SNMP,COPS
対応ディレクトリ・サービス	ActiveDirectory,NDS,Netscape Directory	ActiveDirectory,NDS,Netscape Directory	ActiveDirectory,NDS,Netscape Directory	ActiveDirectory,NDS,Netscape Directory	ActiveDirectory,NDS,Netscape Directory
トラヒック管理機能		別ツール利用	なし	ForeView に含まれる	同社製品のモニタリング機能を利用
備考				ForeView 上でPolicy Based Network Management を動かす	

5-2-2-3 他の研究機関における類似研究及び協力関係状況

- IEEE 802.1Qとして、IDによるVLAN識別を可能にする技術とともに、イーサネットFlameに8段階のPriorityを設けて、優先転送制御を可能にする技術が実用化されている。
- 通信品質の設定・管理に関する研究では、IETFのOperations and Management Areaでの活動が中心的であり、QoS Policy管理の考え方の普及に伴い、Policy Framework Working Group (Policy WG)、Resource Allocation Protocol Working Group (RAP WG)での研究が活発である。("The IETF Activities in the Operations and Management Area", IEEE Communication, Vol.39, No.5 pp.114-116, May 2001)

5-2-2-4 まとめと今後の課題

本課題において本年度は、イーサネットレベルでの通信品質制御を行うために必要となるイーサネットスイッチの通信品質制御技術及び管理技術について調査を行った。その結果、既存の多くのイーサネットスイッチが具備する通信品質(QoS)制御機能として、IEEE 802.1Qに規定されているtagVLAN機能とIEEE 802.1pによるプライオリティ付け機能があることが分かった。さらに、各スイッチの本機能を協調して制御することにより、IPネットワークのQoS機能として注目されているDiffServと類似した制御が可能で、今後のイーサネットアクセス網の高品質化に有効であるとの見識を得た。

また、今後、本研究においてイーサネットワークの品質制御・管理技術評価を行うため、レイヤ2スイッチ、管理サーバ設備およびトラヒック負荷装置を中心とした評価検証設備を調達した。今後の研究進度に合わせ柔軟に機器構成の変更等を行いながらも、有効活用を図っていく。

また、各ネットワーク機器が備えるこれらのQoS制御機能を統合制御するためには、COPS-PRをポリシー配布プロトコルとして用いたポリシーサーバによって制御する方式が、将来のネットワークでは有望であるとの調査検討結果を得ることができ、今後の研究方法の指針をえることができた。

しかし、COPS-PRとポリシーサーバによるイーサネットワークの通信品質制御・管理のためには、ポリシー設定項目(PIB構成)の詳細検討、トータルネットワークでの品質確保を目標としたポリシー設定基準の検討及びその効果の検証が必要であり、今後の課題である。また、更なる課題として、COPSインターフェースを持たない既存のイーサネット機器にも、統一的にポリシー設定が可能な管理装置の実装方式を検討していくも必要であることがわかった。

5-2-3 イ-3 IPネットワークとイーサネットワークの連携技術の研究開発

5－2－3－1 はじめに

本研究テーマでは、IP ネットワークとイーサネットスイッチで構成されるイーサネットネットワークを接続し、相互の品質制御情報をマッピングすることにより End-to-End での通信品質を保証することを目的としている。

本年度は、IP レベルでの通信品質制御パラメータとイーサネットレベルでの通信品質制御パラメータ間での整合性の取り方について調査・検討をおこなった。

5－2－3－2 研究内容

(1) IP ネットワークとイーサネットの連携による通信品質制御技術の調査と整理

5－2－1（イ－1）および5－2－2（イ－2）で IP ルータおよびイーサネットの持つ QoS 機能について整理したことから分かるように、IP レベルでの通信品質制御とイーサネットレベルの通信品質制御を上手く連動させるには、次の 3 点を考慮する必要がある。一つは、IP における DiffServ パラメータと、イーサネットにおける IEEE802.1p 優先度パラメータの間の整合性の取り方についてである。もう一つは IP における ECN とイーサネットにおける IEEE 802.3x フロー制御である。さらにもう一点は、ノードの持つキューの本数に応じた対応方法についてである。

DiffServ パラメータと IEEE 802.1p との間で整合性を取るには、DiffServ が定義している PHB を持つ各転送クラスと IEEE 802.1p のユーザー優先度値の対応関係を明確にする必要がある。基本的には IEEE 802.1p においてトラヒックタイプ別の優先度の利用推奨例が例示されていることから、これに準じる形で DiffServ の各クラスを対応付けるのが望ましい。対応付けを表 21 に示す。

表 21 ユーザー優先度と PHB の対応付け

ユーザー優先度	PHB	トラヒックのタイプ (IEEE802.1p による推奨例)
7(最高)		ネットワーク管理
6	E F	音声
5	A F 1 X	ビデオ
4	A F 2 X	制御された負荷
3	A F 3 X	エクセレントエフォート型
0(デフォルト)	B E	ベストエフォート
2		予備(未定義)
1(最低)		バックグラウンド

次に輻輳時における動作であるが、IP においては ECN が、イーサネットにおいては IEEE

802.3x によるフロー制御がそれぞれ規定されていることから、これらの動作を連携させることが望ましい。

最後にノードが実装しているキューの本数と各優先度および各転送クラスとの関係であるが、DiffServ 対応ルータの場合、最低でも 5 種類のクラスに対応したキューが必要であるが、実際の製品においてはそれ以上の本数をサポートしているのが通常であることから、優先度・クラスと使用するキューとの対応付けが問題となることはまず無いと思われる。

一方イーサネットスイッチの多くは未だにキューの本数が 2 から 4 本程度のものも多くあるため、いくつかの優先度・クラスで同一のキューを共用する必要が生ずる。このような場合には、どのようにシュリンクされるべきかを各ノードの判断で決定する必要があるが、IEEE 802.1p においてはこのような場合の推奨例を表 22 のように例示しているため、他ノードにおける動作と整合性を取る観点から、これに準じるのが望ましいと思われる。

表 22 IEEE 802.1p が推奨する優先度と CoS の対応付け

ユーザー優先度	提供されているキュー(CoS)の数							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	1	1	1	1	2
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	1	1	2	2	3
4	0	1	1	2	2	3	3	4
5	0	1	1	2	3	4	4	5
6	0	1	2	3	4	5	5	6
7	0	1	2	3	4	5	6	7

5-2-3-3 他の研究機関における類似研究及び協力関係状況

レイヤー間の連携方式は、各装置の実装方式に委ねられているため、特に目立った研究は行われていない。

5-2-3-4 まとめと今後の課題

本課題において本年度は、IP レベルでの通信品質制御パラメータとイーサネットレベルでの通信品質制御パラメータ間での整合性の取り方について調査・検討をおこなった。その結果次の 3 点を考慮する必要が分かり、その整合性の取り方について整理した。

- IP における DiffServ の転送クラスと、IEEE 802.1p のユーザ優先度との対応付け
- IP における ECN と IEEE 802.3x におけるフロー制御の連携
- キューの実装数に応じた優先度・クラスのキューへの対応付け

しかしながら、DiffServ 対応 IP 網側から広域イーサネット網側にパケットを送出する際には、さらに検討を深めなければならに点が残っている。既存のイーサネット用の LAN スイ

ツチの多くは、DiffServ クラスに対応するような多くのキューを備えていないことが一般的であり、IEEE 802.1p が規定する 8 段階の優先度に対応するだけのキュー数を備えていないことも多いことから、優先度やクラスが縮退する際の影響について今後見極める必要がある。また幅轍時のフロー制御については、どれだけの量のパケットがキューに滞留したら、どれだけの時間ポーズをかけると効果的かについて検討を深める必要がある。今後は、実際の高臨場感映像のトラヒックに対する影響と、制御パラメータの違いによる効果について評価していく必要がある。

このような異なるレイヤー間の機能の連携方法については、各ノードの実装方式に依存することから、これといった目だった研究発表が行われている事例は無く、ケースバイケースの事例による評価結果を継続的に積み上げていくことが重要である。

5 - 3 総括

課題ア 高臨場感ディスプレイ（IPD）用デジタル映像コンテンツ制作に関する基盤技術の開発

平成 13 年度は、平成 14 年度に行う中間目標までの研究開発に先立ち、課題項目の詳細化、既存技術調査、主要研究設備の調達等を行った。

ア - 1 超大容量映像データ処理・管理技術

画像処理並列化技術に関して、並列化可能な画像処理項目を一般のノンリニア編集システムの機能調査や、弊社が過去に行ったデジタル映像制作時の処理内容などの分析により列挙し、その実装に必要となる公知技術について調査を行った。

また、画像処理並列化技術ならびに超大容量データストレージ技術・データマネージメント技術についての研究開発遂行に必要となる、PC やデータストレージ設備などの選定を行い、その調達を実施した。

ア - 2 超高精細・広視野角映像の撮影技術

次年度以降の研究開発内容の中心となる、複数のビデオカメラなどを用いて超高精細・広視野角の映像を取得する技術について関連公知技術をサーベイすることを目的に、主に現在世界的に注目されている Omni-directional Vision （全方位映像）に関する論文や関連製品についての調査を行った。

また、複数のビデオカメラによって撮影された映像の変換処理を行うことで 1 枚の超高精細・広視野角映像を取得する技術の開発に必要となる、ビデオカメラを中心とした実験開発機器の選定、ならびに、移動するカメラによって撮影された連続する複数の異地点映像を、変換処理を施しながら擬似的にシームレスに接続する技術の開発に必要となる、カメラ、ロボット等の実験開発機器の選定を行った。さらにその報告内容に基づき、これら機器設備の調達を実施した。

ア - 3 幾何学的整合性を考慮した映像編集処理技術

IPD用映像制作・編集過程におけるスクリーン形状やプロジェクト構成の違いに対応するIPD固有の映像編集処理と、それらに関する諸課題を列挙し、その課題解決に必要となる既存技術の調査を行った。さらに、撮影時のカメラパラメータ（撮影位置、撮影方向、焦点距離、光学中心位置、レンズ歪みなど）の扱い方や、ビジョンベースによるカメラ位置の制御方法に関する共通基盤技術の準備のため、コンピュータビジョン（3次元画像認識技術）に関する基礎技術についてのサーベイを行った。

ア-4 リアルタイム映像作成技術

次年度以降に行うマルチカメラによる遠隔監視システムプロトタイプの開発に先立ち、システム全体構想の策定を行った。また、このシステムの実現、ならびに複数カメラによる撮影映像のリアルタイム変換技術の研究開発に必要となる主要設備の選定を行い、その調達を実施した。

課題イ 超広帯域且つ超高品质ネットワーク制御に関する基盤技術の研究開発

平成13年度は、平成14年度からの技術開発、プロトタイプ開発に先立ち、課題項目の基礎検討、既存技術調査、主要研究設備の調達を行った。また、イのテーマ全体の技術開発傾向を把握する目的で、「イーサネット/IPネットにおける通信品質」に関する特許調査を行った。

イ-1 階層フロー識別型通信品質制御技術の研究開発

本課題においては本年度、今後IP網において必要とされる通信品質制御条件を明らかにするために、ネットワークサービスの通信品質の要件項目を調査整理した後、次世代ネットワークで主流になると予想される、映像配信（伝送）システム、IP電話システム、TV会議システムの仕様及びシステム品質要件について調査した。その結果、QoS制御の対象となる制御パラメータには多くのものがあることを明確に整理できた。また、幅較時においてはアプリケーションによってどれを優先的に実現させるのか、トレードオフの関係にあるパラメータも多くあることも明らかになった。

さらに、End-to-Endで品質を維持するために、現在実現されている機能を調査した結果、アプリケーション、プロトコル、中継ノードのそれぞれに、様々な機能が実際に使われており、それらを上手く協調させて連携して用いることが、今後のネットワークにおけるQoS制御の方向であるとの見識を得た。

また、今後、本研究においてIP網におけるEnd-to-Endの品質制御のための多階層フロー品質制御技術の実験と評価を行うため、レイヤー2スイッチ、IPルーター、管理サーバ設備およびトラヒック付加装置を中心とした評価検証設備を調達した。今後の研究震度に併せ柔軟に機器構成の変更を行いながらも、有効活用を図っていく。

イ-2 イーサネットにおける通信品質制御、管理技術の研究開発

本課題において本年度は、イーサネットレベルでの通信品質制御を行うために必要となるイーサネットスイッチの通信品質制御技術及び管理技術について調査を行った。その結

果、既存の多くのイーサネットスイッチが具備する通信品質(QoS)制御機能として、IEEE 802.1Qに規定されているtagVLAN機能とIEEE 802.1pによるプライオリティ付け機能があることが分かった。さらに、各スイッチの本機能を協調して制御することにより、IPネットワークのQoS機能として注目されているDiffServと類似した制御が可能で、今後のイーサネットアクセス網の高品質化に有効であるとの見識を得た。

また、今後、本研究においてイーサネットワークの品質制御・管理技術評価を行うため、レイヤ2スイッチ、管理サーバ設備およびトラヒック負荷装置を中心とした評価検証設備を調達した。今後の研究進度に合わせ柔軟に機器構成の変更等を行ながらも、有効活用を図っていく。

また、各ネットワーク機器が備えるこれらのQoS制御機能を統合制御するためには、COPS-PRをポリシー配布プロトコルとして用いたポリシーサーバによって制御する方式が、将来のネットワークでは有望であるとの調査検討結果を得ることができ、今後の研究方法の指針をえることができた。

しかし、COPS-PRとポリシーサーバによるイーサネットワークの通信品質制御・管理のためには、ポリシー設定項目(PIB構成)の詳細検討、トータルネットワークでの品質確保を目標としたポリシー設定基準の検討及びその効果の検証が必要であり、今後の課題である。また、更なる課題として、COPSインターフェースを持たない既存のイーサネット機器にも、統一的にポリシー設定が可能な管理装置の実装方式を検討していく必要があることがわかった。

イー3 IPネットワークとイーサネットワークの連係技術の研究開発

本課題において本年度は、IPレベルでの通信品質制御パラメータとイーサネットレベルでの通信品質制御パラメータ間での整合性の取り方について調査、検討をおこなった。その結果次の3点を考慮する必要が分かり、その整合性の取り方について整理した。

- ・ IPにおけるDiffServの転送クラスと、IEEE802.1pのユーザ優先度との対応付け
- ・ IPにおけるECNとIEEE802.3xにおけるフロー制御の連携
- ・ キューの実装数に応じた優先度・クラスのキューへの対応付け

しかしながら、DiffServ対応IP網側から広域イーサネット網側にパケットを送出する際には、さらに検討を深めなければならぬ点が残っている。既存のイーサネット用のLANスイッチの多くは、DiffServクラスに対応するような多くのキューを備えていないことが一般的であり、IEEE802.1pが規定する8段階の優先度に対応するだけのキュー数を備えていないことも多いことから、優先度やクラスが縮退する際の影響について今後見極める必要がある。また輻輳時のフロー制御については、どれだけの量のパケットがキューに滞留したら、どれだけの時間ポーズをかけると効果的かについて検討を深める必要がある。今後は、実際の高臨場感映像のトラヒックに対する影響と、制御パラメータの違いによる効果について評価していく必要がある。

このような異なるレイヤー間の機能の連携方法については、各ノードの実装方式に依存す

ることから、これといった目だった研究発表が行われている事例は無く、ケースバイケー
スの事例による評価結果を継続的に積み上げていくことが重要である。

参考文献

- [Adiv 1985] G. Adiv, "Determining three-dimensional motion and structure from optical flow generated by several moving objects", IEEE Trans. PAMI, Vol. 7, 1985.
- [Caprile 1990] B. Caprile and V. Torre, "Using vanishing points for camera calibration", International Journal of Computer Vision, No.4, 1990.
- [Chen 1995] S. E. Chen. "Quicktime VR - An image-based approach to virtual environment navigation", In Proc. SIGGRAPH 95, pages 29-38, 1995.
- [Chen 95] S. E. Chen. "Quicktime VR - An image-based approach to virtual environment navigation," In Proc. SIGGRAPH 95, pages 29-38, 1995.
- [Das 2001] A. K. Das, R. Fierro, V. Kumar, B. Southall, J. Spletzer, C. J. Taylor, "Real-Time Vision-Based Control of a Nonholonomic Mobile Robot", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1714-1719, 2001.
- [DeMenthon 1992] D. DeMenthon and L. S. Davice, "Exact and approximate solutions of the perspective-three-point problem", IEEE Trans. PAMI, Vol. 14, No. 11, 1992.
- [Dhond 1989] R. Dhond and J. K. Aggarwl, "Structure from stereo - a review", IEEE Trans. on SMC, Vol. 19, No. 6, 1989.
- [Doi 2001] Proceedings of the 2001 IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robotics (Humanoids 2001), 2001.
- [Faugeras 1990] O. Faugeras and S. Maybank, "Motion from point matches: multiplicity of solutions ", International Journal of Computer Vision, No. 4, 1990.
- [Faugeras 1993] O. Faugeras, Three-Dimensional Computer Vision, MIT Press, 1993.
- [Foote 2000] J. Foote, D. Kimber, "FlyCam:Practical Panoramic Video and Automatic Camera Control", Proc. ICME'2000, pp. 1419-1422, 2000.
- [Haralick 1991] R. M. Haralick and C. Lee, "Analysis and solutions of the three point perspective pose estimation problem", IEEE Proc. CVPR, 1991.
- [Hartley 1995 a] R. Hartley, "In defense of the 8-point algorithm", IEEE Proc. ICCV, 1995.
- [Hartley 1995 b] R. Hartley, "A linear method for reconstruction from lines and points", IEEE Proc. ICCV, 1995.
- [Hartley 2000] R. Hartley and A. Zisserman, Multiple view geometry in computer vision, Cambridge, 2000.
- [Hicks 2000] R. A. Hicks, "Catadioptric Sensors that Approximate Wide-angle Perspective Projections", Proc. CVPR, pp. I:545-551, 2000.
- [Hicks 2001] R. A. Hicks, RuzenaBajcsy, "Reflective Surfaces as Computational Sensors", IVC(19), No. 11, pp. 773-777, 2001.
- [Higgins 1981] H. C. Longuet-Higgins, "A computer algorithm for reconstruction a scene from two projections", Nature, Vol. 293, No. 8, 1981.

- [Horn 1987] B. K. P. Horn, "Closed-form solutions of absolute orientations using unit quaternions", J. Opt. Soc. America, A, Vol. 4 No. 4, 1987.
- [Huang 1989] T. S. Huang and C. H. Lee, "Motion and structure from orthographic projections", IEEE Trans. PAMI, Vol. 11, 1989.
- [Huang 1989] T. S. Huang and, O. D. Faugeras, "Some properties of the E matrix in two-view motion estimation", IEEE Trans. PAMI, Vol. 11, No. 12, 1989.
- [Jogan 2000] M. Jogan, A. Leonardis, "Robust Localization using Eigenspace of Spinning-Image", Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, pp. 37-44, 2000.
- [Kanatani 1993] K. Kanatani, Geometric Computation for Machine Vision, Oxford Science Publications, 1993.
- [Kanatani 1996] K. Kanatani, Statistical Optimization for Geometric Computation : Theory and Practice, North-Holland, 1996.
- [Kaprinos 2001] B. Kaprinos, M. Jenkin, E. Milios, J. K. Tsotsos, "EYES'N EARS FACE DETECTION ", 2001 International Conference on Image Proc. (ICIP 2001) , 2001.
- [Lants 2001] Ed. Lants, et al, "Computer Graphics for Large-Scale Immersive Theaters", ACM SIGGRAPH Course Note, 2001.
- [Luong 1996] Q. T. Luong and O. Faugeras, "The fundamental matrix : theory, algorithms and stability analysis", International Journal of Computer Vision, Vol. 1, No. 17, 1996.
- [Marques 2001] C. F. Marques, P. U. Lima, "A Localization Method for a Soccer Robot Using a Vision-Based Omni-Directional Sensor", RoboCup 2000 Book, 2001.
- [Maybank1992] S. J. Maybank and O. D. Faugeras, "A theory of self-calibration of a moving camera", International Journal of Computer Vision, Vol. 8, No. 2, 1992.
- [Molnar 1994] S. Molnar, M. Cox, D. Ellsworth, and H. Fuchs, "A Sorting Classification of Parallel Rendering", IEEE Comp. Graph. and Appl., pp. 23-31, 1994.
- [Moriya 2000 a] T. Moriya and H. Takeda, "Camera motion control for panoramic image composition," IAS-6, Proc. Sixth International Conference on Autonomous Systems, 2000.
- [Moriya 2000 b] T. Moriya and H. Takeda, "Solving the rotation-estimation problem by using the perspective three-point algorithm", IEEE Proc. CVPR, 2000.
- [Moriya 2000 c] T. Moriya and H. Takeda, "Correcting planar surface inconsistency in camera pose estimation from three or more images," ACCV2000, Proc. Fourth Asian Conference on Computer Vision, 2000.
- [Nayar 1997 a] S. K. Nayar, "Omnidirectional Video Camera", Proc. of DARPA Image Understanding Workshop, New Orleans, May 1997.
- [Nayar 1997 b] S. K. Nayar, "Catadioptric Omnidirectional Camera", Proc. of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, PuertoRico, Junel 1997.
- [Ohanian 1996] T. A. Ohanian, M. E. Philips, "Digital Film Making", Focal Press, 1996.
- [Phillip 1991] J. Phillip, "Estimation of three-dimensional motion of rigid objects from noisy ob-

- servation", IEEE Trans. PAMI, Vol. 13, 1991.
- [Se 2001] S. Se, D. Lowe, and J. J. Little. "Vision-based mobile robot localization and mapping using scale-invariant features," submitted to ICRA-00, 2000.
- [Shashua 1995] A. Shashua, "Algebraic functions for recognition." IEEE Trans. PAMI, 1995.
- [Shimamura 2000 a] J. shimamura, N. Yokoya, H. Takemura, K. Yamazawa, "Construction of an Immersive Mixed Environment using an Omnidirectional Stereo Image Sensor", Proc. IEEE Workshop on omnidirectional Vision, Hilton Head, South Carolina, pp. 62-69, June 2000.
- [Shimamura 2000 b] J. shimamura, H. Takemura, N. Yokoya, K. Yamazawa, "Construction and Presentation of a Virtual Environment Using Panoramic Stereo Images of a Real Scene and Computer Graphics Models", Proc. 15th Int. Conf. on Pattern Recognition (15ICPR), Barcelona Spain, Vol.4, pp. 463-467, September 2000.
- [Svensson 1987] L. Svensson and A. Naeve, "Estimating the N-dimensional motion of (N-1)-dimensional hyperplane from two matched images of (N+1) of its points", Proc. the 5th Scandinavian Conference on Image Analysis, 1987.
- [Szeliski 1997] R. Szeliski and H. Shum. "Creating full view panoramic image mosaics and environment maps", Proc. of SIGGRAPH, pages 251-258, 1997.
- [Szeliski 97] R. Szeliski and H. Shum. "Creating full view panoramic image mosaics and environment maps," In Proc. of SIGGRAPH, pages 251-258, 1997.
- [Tomasi 1991] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and motion from image streams: a factorization method", Technical Report CMU-CS-91-132, SMU, 1991.
- [Triggs 1996] B. Triggs, "Factorization methods for projective structure and motion", IEEE Proc. CVPR 96, 1996.
- [Trucco 1998] E. Trucco and A. Verri, Introductory Techniques for 3-D Computer Vision, Prentice Hall, 1998.
- [Takeda 1999] H. Takeda, M. Yamasaki, T. Moriya, T. Minakawa, F. Beniyama and T. Koike, "A Video-based Virtual Reality System," ACM Proc. VRST'99, 1999.
- [Tsai 1982] R. Y. Tsai, T. S. Huang and W. Zhu, "Estimating three-dimensional motion parameters of a rigid planar patch, II: singular value decomposition", IEEE Trans. on Acoustic, Speech, and Signal Proc, Vol. ASSP-30, No.4, 1982.
- [Tsai 1984] R. Y. Tsai and T. S. Huang, "Uniqueness and estimation of three-dimensional motion parameters of rigid objects with curved surfaces", IEEE Trans. PAMI, Vol. 6, 1984.
- [Weng 1989] J. Weng, T. S. Huang and N. Ahuja, "Motion and structure from two perspective views : Algorithms, error analysis and estimation", IEEE Trans. PAMI, Vol. 11, 1989.
- [Weng 1992] J. Weng, P. Cohen and M. Herniou, "Camera calibration with distortion models and

- accuracy evaluation”, IEEE Trans. PAMI, Vol. 14 No. 10, 1992.
- [Winters 2000] N. Winters, J. Gaspar, G. Lacey, J. Santos-Victor, “Omnidirectional vision for Robot Navigation”, Proc IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, pp.21-28, 2000.
- [Wolfe 1991] W. J. Wolfe, D. Mathis, C. W. Sklair, and M. Magee, “The perspective view of three points”, IEEE Trans. PAMI, Vol. 13, No. 1, 1991.
- [yamasaki 2002] M. Yamasaki, T. Minakawa, H. Takeda, S. Hasegawa, and M. Sato, "Technology for seamless multi-projection onto a hybrid screen composed of differently shaped surface elements," Proc. IPT 2002, 7th Annual Immersive Projection Technology Symposium, 2002.
- [Yamazawa 2000] K. Yamazawa, Y. Onoe, N. Yokoya, H. Takemura, “Telepresence by Real-Time View-Dependent Image Generation from Omnidirectional Images”, Systems and Computers in Japan, Vol.31, No.6, pp.56-64, June 2000.
- [Zhu 2000] Z. Zhu, K. Rajaselar, E. Riseman, All.Hanson, “Panoramic Virtual Stereo Vision of Cooperative Mobile Robots for Localizing 3D Moving Objects”, Proc. IEEE Workshop on Omnidirectional Vision, pp.29-36, 2000.
- [吉利 1987] 吉利俊一, 金谷 健一, 線形代数, 講談社, 1987.
- [池内 2001] 池内克史, 坂内正夫, 川崎洋, 高橋拓二, 村尾真洋, 佐藤いまり, 甲斐郁代, “全方位画像による仮想都市空間の生成”, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, pp. 49-58, 2001.
- [石黒 1995] 石黒浩, 前田武志, 辻三郎, “全方位画像記憶に基づくロボットの誘導”, ロボットシンポジウム予稿集, pp. 1339-1344, 1995.
- [石黒 1998] 石黒浩, “分散視覚システム”, 日本ロボット学会誌, 1998
- [石黒 2001] 石黒浩, “分散全方位視覚システムの研究”, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 42, No. SIG 13 (CVIM 3), pp. 33-40, 2001.
- [市川晃 1999] 市川晃, 竹家章仁, “全方位視覚システムの最適設計”, 計測自動制御学会論文集 Vol. 35 No. 10, 1999.
- [市川徹 2000] 市川徹, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢 直和, “高解像度全方位画像センサを用いたイベント検出”, 2000 年電子情報通信学会情報・ソサイエティ大会講演論文集 D-12-52, pp. 239, September 2000.
- [市川徹 2001] 市川徹, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢 直和, “高解像度全方位ビデオカメラを用いた遠隔監視システムにおけるイベント検出”, 信学技報, PRMU2000-213, Vol. 100, No. 701, pp. 87-94, March 2001.
- [岩田 2001] 岩田洋夫, “全方位映像呈示技術”, 情報処理学会論文誌 Vol. 42, pp. 41-48, 2001.
- [岡谷 2001] 岡谷貴之, 出口光一郎, “反射鏡を利用した全方位カメラにおける画像の照度について”, 情報処理学会論文誌 Vol. 42, pp. 71-80, 2001.

- [戎野 1999] 戻野聰一, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “円筒パターンを用いた全周ステレオ画像センサのキャリブレーション手法”, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集, 1999.
- [戎野 2000] 戻野聰一, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “6角錐ミラーを用いた全周ステレオ画像センサによる実環境の仮想環境への取り込み”, 信学技報, MVE99-82, pp. 37-44, March 2000.
- [金谷 1990] 金谷健一, 画像理解, 森北出版, 1990.
- [金谷 1995] 金谷健一, 空間データの数理－3次元コンピューティングに向けて－, 朝倉書店, 1995.
- [興梠 2000] 興梠正克, 蔵田武志, 坂上勝彦, 村岡洋一, “パノラマベースドアノテーション: 全方位画像を用いたコンテンツ作成の簡便化とジャイロセンサーを用いた注釈定時の安定化”, 第6回画像センシングシンポジウム(SSII2000), pp. 381-386, 2000.
- [戴 2001] 戴桂明, 小泉智史, 石黒浩, “Town DigitizingにおけるWalkthroughシステム”, 第7回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp. 201-204, 2001.
- [島村 1999] 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “全周実画像とCGモデルの合成による仮想環境の構成と提示”, 信学技報 PRMU99-59, July 1999.
- [島村 2000] 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “全周実画像とCGモデルの合成による仮想環境の構築”, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2000), Vol. II, pp. 367-372, July 2000.
- [徐 1998] 徐剛, 辻三郎, 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- [関森 2001] 関森大介, 臼井智也, 升谷保博, 宮崎文夫, “全方位画像に基づく移動ロボットの高速な障害物回避と自己位置推定”, 情報処理学会論文誌, Vol.42, pp. 110-117, 2001.
- [高木 1991] 高木幹雄, 下田陽久, 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 1991.
- [高橋 2001] 高橋拓二, 川崎洋, 池内克史, 坂内正夫, “全方位画像を用いた広域環境の自由視点レンダリング”, 情報処理学会論文誌, Vol.42, pp. 99-109, 2001.
- [棚橋 2000 a] 棚橋英樹, 山本和彦, 桑島茂純, 丹羽義典, “ステレオ全方向画像システム(SOS)の開発”, 第6回画像センシングシンポジウム講演論文集, pp.145-150, Jun. 2000.
- [棚橋 2000 b] 棚橋英樹, 山本和彦, 桑島茂純, 丹羽義典, “全方向ステレオシステム(SOS)の試作”, 電気関係学会東海支部連合大会 平成12年度電気関係学会東海支部連合大会講演論文集, S-65-66, Sep. 2000.
- [棚橋 2000 c] 棚橋英樹, 丹羽義典, 島田大輔, 山本和彦, “全方向ステレオシステム(SOS)を用いた移動体追跡”, 外観検査の自動化ワークショップ(VIEW2000), pp.67-72, Dec. 2000.
- [棚橋 2001 a] 棚橋英樹, 山本和彦, 島田大輔, 丹羽義典, “全方向ステレオシステム(SOS)

- S) のステレオ情報を用いた空間イベントの取得”, 情処研報, 2001-CVIM-125-14, Jan. 2001.
- [棚橋 2001 b] 棚橋英樹, “全方向ステレオシステム（SOS）による実環境計測”, 第2回光センシング研究会, Jan. 2001.
- [棚橋 2001 c] 棚橋英樹, 島田大輔, 山本和彦, 丹羽義典, “全方向ステレオシステムを用いた実環境モデルの生成”, 画像センシングシンポジウム（SSII2001）, pp.205-210, Jun. 2001.
- [棚橋 2001 d] 棚橋英樹, 王彩華, 丹羽義典, 山本和彦, “全方向ステレオシステム（SOS）を用いた球面統合画像の生成”, 平成13年度電気学会電子・情報・システム部門大会電気学会C部門誌, pp.523-528, Sep. 2001.
- [棚橋 2001 e] 棚橋英樹, 佐藤淳, 王彩華, 丹羽義典, 山本和彦, “没入型ディスプレイを用いた全方向ステレオシステム（SOS）のカメラキャリブレーション”, 情処研報, 2001-CVIM-130-2, Nov. 2001.
- [棚橋 2001 f] 棚橋英樹, 佐藤淳, 丹羽義典, 桑島茂純, 山本和彦, “全方向ステレオシステム（SOS）を用いた実環境の実時間再構築”, 電気学会 情報処理・産業システム情報化合同研究会, pp.11-16, Nov. 2001.
- [棚橋 2002] 棚橋英樹, 佐藤淳, 王彩華, 丹羽義典, 山本和彦, “全方向ステレオシステム（SOS）のキャリブレーション手法”, 映像情報メディア学会誌, Vol.56, No.4, pp.603-610, Apr. 2002.
- [谷 2001] 谷寿人, 大野和彦, 中島浩, “PCクラスタによるドーム投影のための画像変形補正法”, 情報処理学会研究報告, 2001-ARC-143, pp.1-24, May, 2001.
- [出口 1991] 出口光一郎, 画像と空間－コンピュータビジョンの幾何学－, 昭晃堂, 1991.
- [出口 2000] 出口光一郎, ロボットビジョンの基礎, コロナ社, 2000.
- [手塚 2001] 手塚宏史, 堀敦史, 石川裕, 曽田哲之, 原田浩, 古田敦, 山田努, “PCとギガビットLANによるPCクラスタの構築”, 情報研報, 96-ARC-119, pp.37-42, Aug., 1996.
- [寺沢 2000] 寺沢征彦, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “3台の全方位画像センサを使った重なり判定による人物追跡”, 2000年電子情報通信学会情報・ソサイエティ大会講演論文集 D-12-58, pp.245, September 2000.
- [寺沢 2001] 寺沢征彦, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “複数の全方位画像センサを用いた遠隔監視システムにおける複数移動物体の存在領域推定”, 信学技報, PRMU2000-195, February 2001.
- [土居 2001] 土居正崇, 橋本周司, “全方位視覚センサとステレオ距離計測による移動ロボットの環境認識”, 2001 画像電子学会第29回年次大会予稿集, pp.49-50, 2001.
- [十河 2001] 十河卓司, 石黒浩, “分散全方位視覚システムの研究”, 情報処理学会論文誌, Vol.42, pp.33-40, 2001.

- [中尾 2001] 中尾敏康, 柏谷篤, “投影中心移動を用いた画像合成に基づく2軸回転鏡型広視野カメラ”, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, pp. 81-89, 2001.
- [長原 2001] 長原一, 浜田博昭, 八木康史, 谷内田正彦, “全方位視覚センサを用いた高解像度3Dモデリング”, 情報処理学会論文誌 Vol. 42, pp. 90-98, 2001.
- [畠田 1981] 畠田豊彦, “広視野動画像による臨場感の客観的測定”, テレビジョン学会技術報告, Vol. 5, No. 29, 1981.
- [廣瀬 1994] 廣瀬道孝, 中垣好之, 谷口雅昭, 小森信也, 遠藤隆明, “はいれるテレビの開発”, 情処研技, 94-69-1, 1994.
- [紅山 2000] 紅山史子, 守屋俊夫, 武田晴夫, “部分画像合成による実時間超高精細映像表示”, 情報処理学会全国大会第60回全国大会, 2000.
- [紅山 2001] 紅山史子, 宇都木契, 皆川剛, 守屋俊夫, 武田晴夫, “マルチスクリーン用映像における実写/C G遷移”, 情報処理学会第63回全国大会, 2001.
- [紅山 2002] 紅山史子, 守屋俊夫, “超高精細映像表示のためのカメラ位置を考慮した部分画像合成方法”, 電子情報通信学会 2002年総合大会, 2002.
- [松尾 1992] 松尾啓志, 和田錦一, 岩田彰, 鈴村宣夫, “分散画像処理環境 VIOS”, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J75-D-II N 8, pp. 1328-1337, Aug, 1992.
- [松山] 松山隆司, “分散強調視覚による動的3次元状況理解”.
- [松山 1995] 松山隆司, 浅田尚紀, 青山正人, 朝津英樹, “再帰トーラス結合アーキテクチャにおける並列対象認識のためのデータレベル並列プロセスの構成”, 情処学論.
- [守屋 1999] 守屋俊夫, 紅山史子, 山崎真見, 武田晴夫, “高臨場感ディスプレイのためのディジタル映像制作環境の構築”, 情報処理学会第59回全国大会 特別セッション, 1999.
- [守屋 2001] 守屋俊夫, 皆川剛, 宇都木契, 紅山史子, 武田晴夫, “射影モデルの適応的解釈による高臨場感ディスプレイへの映像表示”, 情報処理学会第63回全国大会, 2001.
- [八木 2001 a] 八木康史, 横矢直和, “全方位ビジョン: センサ開発の応用の最新動向”, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, pp. 1-18, 2001.
- [八木 2001 b] 八木康史, 谷内田正彦, “実時間全方位視覚センサ”, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, pp. 19-32, 2001.
- [八木 2001 c] 八木康史, 横矢直和, “全方向ビジョン: センサの開発と応用の最新動向”, 情報処理学会論文誌, コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 42, No. STG13(CVIM3), 2001.
- [山口 1999 a] 山口晃一郎, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “全方位動画像を用いた任意方向の両眼ステレオ画像の生成”, 情報処理学会第59回全国大会講演論文集(2), pp. 245-246, September 1999.
- [山口 1999 b] 山口晃一郎, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “全方位動画像を用いた任意方

- 向両眼ステレオ画像の実時間生成と提示”, 信学技報 PRMU99-159, Nobember 1999.
- [山崎 1999] 山崎眞見, 皆川剛, 武田晴夫, 川瀬宏, “ディジタルプロジェクトアレイシステムの開発”, 映像情報メディア学会大会, 1999.
- [山澤 1996] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦, “移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ Hyper Omnicision の提案”, 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol. J79-D-II No5 PP. 698-707, 1996.
- [山本 2001] 山本和彦, 棚橋英樹, 桑島茂純, 丹羽義典, “実環境センシングのための全方向ステレオシステム”, 電子学会論文誌C 電子・情報・システム部門誌, Vol.121-C 5 2001, pp.876-881, Mar. 2001
- [横矢 2000] 横矢直和, “実写に基づく 3 次元パノラマ画像合成”, 日本工業出版「画像ラボ」第 11 卷第 11 号, pp6-10, 2000.
- [横矢 2001 a] 横矢直和, “全方位ビデオカメラの視覚情報メディアへの応用”, CVIM 研究会, 2001.
- [横矢 2001 b] 横矢直和, 山澤一誠, 竹村治雄, “全方位ビデオカメラを用いた視覚情報メディア”, 情報処理学会論文誌, Vol. 42, pp. 59-70, 2001.
- [米田 2000] 米田美里, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和, “全方位動画像からの両眼ステレオ画像生成による移動ロボットの遠隔操縦”, 信学技法, PRMU2000-144, 2000.
- [渡辺 2001] 渡辺博己, 本郷仁志, 安本護, 棚橋英樹, 丹羽義典, 山本和彦, “全方向ステレオシステムを用いたポインティングジェスチャの方向・対象物推定”, 外観検査の自動化ワークショップ (VIEW2002) , pp.111-116, Dec. 2001.
- [3com] <http://www.3com.co.jp/index.html>
- [Accowle a] <http://www.accowle.com/index-1.htm>
- [Accowle b] <http://www.accowle.com/index-2.htm>
- [Accowle c] <http://www.pluto.dti.ne.jp/%7Eaccowle1/spec.html>
- [ActivMedia a] <http://www.activrobots.com/ROBOTS/core.html>
- [ActivMedia b] <http://www.activrobots.com/ROBOTS/p2dx.html>
- [ActivMedia c] <http://www.activrobots.com/ROBOTS/p2at.html>
- [ActivMedia d] <http://www.activrobots.com/ROBOTS/peoplebot.html>
- [ActivMedia e] Pioneer2 / PeopleBot Operations Manua 1 v9.
- [Arcbrain] <http://www.Arcbrain.co.jp>
- [Bytelux] <http://www.bytelux.com/rayz>
- [Cbel a] 株式会社シーベル
<http://www.c-bel.co.jp/pdf/SP-D22.PDF>
- [Cbel b] 株式会社シーベル
 スーパープリセットドームカメラ SP-D22L カタログ, 2001

- [Cinesell] <http://www.cinesell.co.jp/works/visual/index.html>
- [Columbia-U] <http://www.cs.columbia.edu/CAVE/VSAM/projects/>
- [Compaq] http://www.compaq.co.jp/products/storage/110_220gb_qu.html
- [DELL a] Dell Computer Corporation,
http://www.dell.com/us/enbsd/products/model_prcn_prcn_340.htm
- [DELL b] デルコンピュータ株式会社, Precision WorkStation Series 340 カタログ, 2001
- [Discreet] <http://www.discreet.jp/products/combustion>
- [Doshisha] <http://www.is.doshisha.ac.jp/SMPP/report/2001/020213/mycom/mycom.htm>
- [Dpsj] <http://www.dpsj.co.jp>
- [Freebsd] <http://www.freebsd.org>
- [FujiXerox] http://www.fxpal.com/smartspace/flycam/flycam_home.htm
- [Fujitsu] <http://primeserver.fujitsu.com/primergy/sl/>
- [Fullview] <http://www.fullview.com/technology.html>
- [GRASP Lab] <http://www.cis.upenn.edu/~kostas/omni.html>
- [Genex] http://www.genextech.com/products_services/omnienter/overview.html
- [Hitachi a] http://www.hitachi.co.jp/Prod/comp/Osd/ws/h900v/sv_vt_mf.htm
- [Hitachi b] 株式会社日立製作所, 日立画像処理装置 IP5000 シリーズカタログ,
<http://www.hitachi.co.jp/Div/omika/prdcts/h-ip/ip5000.pdf>
- [HolyWood] http://info.nikkeibp.co.jp/sakuhin/linuxcafe/cases/case4_1.html
- [IBM] <http://www-6.ibm.com/jp/pc/vlp/ca27/3219334/3219334a.html>
- [Immersivemedia] <http://www.immersivemedia.com/products.html>
- [Jcsn] <http://www.jcsn.co.jp>
- [Kyoto-U] <http://www.lab7.kuis.kyoto-u.ac.jp/vision/omni-sensor/hyper.html>
- [Linux] <http://www.linux.org>
- [MIL] Matrox Graphics Inc., <http://www.matrox.com/imaging/products/mil/home.cfm>
- [Matrox a] 株式会社住友金属システムソリューションズ, 画像処理製品総合資料, 2001
- [Matrox b] Matrox Graphics Inc.,
http://www.matrox.com/imaging/products/meteor2_mc/home.cfm
- [Microsoft a] <http://www.microsoft.com/japan/ms.htm>
- [Microsoft b] <http://research.microsoft.com/~rcutler/ringcam/ringcam.htm>
- [Mitsubishi a] http://www.nagoya.melco.co.jp/robot/details/index_j.htm
- [Mitsubishi b] 三菱電機産業用ロボット RV-1A/2AJ シリーズ標準仕様書
- [Mitsubishi c] 三菱電機産業用ロボット CR1/CR2/CR4/CR7/CR8 コントローラ取扱説明書
- [Mitsubishi d] 三菱電機産業用ロボット パソコンサポートソフトウェア取扱説明書
- [Mitsubishi e] 三菱電機産業用ロボット CRn-500 シリーズイーサネットインターフェース取扱説明書
- [Myri] <http://www.myri.com>

- [Netbsd] <http://www.netbsd.org>
- [Neuronics a] Katana User Manual and Technical Description Version 1.19
- [Neuronics b] <http://www.neuronics.ch/Englisch/Index.htm>
- [Optechnology] <http://optechnology.com/Radial%20Metrology/radial%20metrology.htm>
- [Photron a] 株式会社フォトロン, PCI バス画像入力ボード FDM-PCI IV カタログ, 2000
- [Photron b] 株式会社フォトロン,
<http://www.photron.co.jp/sub-hs/products/fdm/pci4t.htm>
- [PixelShader] J.L.Mitchell,"Advanced vertex and pixel shader technique," 2001,
http://www.ati.com/developer/ATI_EGDC_AdvancedShaders.pdf
- [PointGreyResearch a] Point Grey Research Inc.,
<http://www.ptgrey.com/products/ladybug/middlemiddle.htm>
- [PointGreyResearch b] Point Grey Research Inc.,
<http://www.ptgrey.com/products/digiclops/>
- [Remotereality] <http://www.remotereality.com/vtprod/>
 - [Revast a] <http://www.revast.co.jp/katana/katana.html>
 - [Revast b] <http://www.revast.co.jp/Activ/pioneer2/pioneer2frame.html>
 - [Revast c] <http://www.revast.co.jp/Activ/people/peopleframe.html>
 - [Revast d] 小型高性能ーム KATANA 取扱説明書
[SGI] Silicon Graphics, Inc.,
<http://www.sgi.com/>
 - [Sharp] <http://www.sharp.co.jp/corporate/news/010919-2.html>
 - [Shinki] <http://www.shinkicorp.co.jp>
 - [Sony a] <http://www.sony.jp/products/Professional.DateArchive/BC2/BC2-2/AIT-S100 D/>
 - [Sony b] <http://www.sony.jp/products/Professional/DateArchive/BC2/BC2-1/GY2120/index.html>
 - [Sony c] <http://www.sony.jp/products/Professional/DateArchive/BC2/BC2-1/GY8240/index.html>
 - [Sony d] <http://www.sony.co.jp>
 - [Sony e] <http://www.sony.co.jp/Products/fourthview/>
 - [Sony f] ソニー株式会社,
<http://www.sony.jp/products/Professional/SENSORCAMERA/dxc-9000/>
 - [Sony g] ソニー株式会社, DXC-9000 カタログ, 1996
 - [Sony h] ソニー株式会社,
<http://www.sony.co.jp/Products/ISP/products/color/XC003.html>
 - [Sony i] ソニー株式会社, XC-003/003P カタログ
 - [Suekage] <http://www.suekage.com/>
 - [Sun] <http://www.sun.co.jp/storage/tape/dds/>

- [Toshiba] <http://www.open-I.ne.jp/root/seihinn/strage/lto.htm>
- [Trinity_C] <http://www.cs.tcd.ie/Niall.Winters/tcdomni.html>
- [Viewplus a] <http://www.viewplus.co.jp/>
- [Viewplus b] 株式会社ビュープラス, 全方位デジタルカメラ Ladybug カタログ, 2002
- [Viewplus c] 株式会社ビュープラス, フルデジタルステレオビジョン Color Digiclops.
Stereo Vision System カタログ
- [Vstone] <http://www.vstone.co.jp/>

[Jacobson 1988] Van Jacobson "Congestion avoidance and control", ACM SIGCOMM'88, pp.314-329,

(Aug'88)

- [青山 2000] 青山友紀 "ネットワークの進化と IP 技術", 電子情報通信学会会誌, Vol.83, No.4 pp.248-256 (2000.4)
- [Carpenter 2000] Brian E.Carpenter "通信インフラストラクチャを目指した IP ネットワーク", 電子情報通信学会会誌, Vol.83, No.4 pp.257-262 (2000.4)
- [鈴木 2000] 鈴木敏明 他 1 名 "IP 映像通信システムの標準化動向と IP 映像システム", 電子情報通信学会会誌, Vol.83, No.4 pp.312-316 (2000.4)
- [福永 2000] 福永茂 "国際標準に見る動画像符号化のエラーライフサイクル", 電子情報通信学会会誌, Vol.83, No.4 pp.317-320 (2000.4)
- [砂田 2001] 砂田和洋 "VoIP を現実にする通信インフラ技術—QoS を含む VoIP のためのルーター技術—", 情報処理学会会誌 Vol.42, No.2 pp.136-140 (2001.2)
- [勝本 2000] 勝本道哲 "超高品质メディアの高速 IP 転送技術報告", 情報処理学会誌 Vol.41, No.12 pp.1327-1331(2000.12)
- [櫻井 1999] 櫻井智明 他 1 名 "ストリーミング技術", Internetweek 99 講演資料 (1999)
- [WANG 1999] Xin WANG et.al "Comparison of Adaptive Internet Multimedia Applications", IEICE Transaction on communications Vol.E82-B,N0.6 (1999.6)
- [Steinmetz 1996] R.steinmetz "Human perception of jitter and media synchronization", IEEE J.Select. Areas Communication Vol.14 no.1 (1996.1)
- [Postel 1981 a] J. Postel. "Transmission Control Protocol", IETF RFC0793 Sep-01-1981
- [Mogul 1990] J.C. Mogul. et.al "Path MTU discovery", IETF RFC1191 Nov-01-1990
- [Jacobson 1992] V. Jacobson et.al "TCP Extensions for High Performance", IETF RFC1323 May 1992
- [Simpson 1994] W. Simpson et.al "The Point-to-Point Protocol (PPP)", IETF RFC1661 July 1994
- [Baker 1995] F. Baker et.al "Requirements for IP Version 4 Routers", IETF RFC1812 June 1995
- [Schulzrinne 1996] H. Schulzrinne et.al "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications", IETF RFC1889 January 1996
- [Simpson 1996] W.Simpson "PPP Challenge Handshake Authentication Protocol (CHAP)", IETF RFC1994 August 1996
- [Mathis 1996] M. Mathis et.al "TCP Selective Acknowledgement Options", IETF RFC2018 October 1996
- [Braden 1997] R. Braden et.al "Resource ReSerVation Protocol (RSVP) -- Version 1 Functional Specification", IETF RFC2205 September 1997
- [Braden 1998] B. Braden et.al "Recommendations on Queue Management and Congestion Avoidance in the Internet", IETF RFC2309 April 1998
- [Schulzrinne 1998] H. Schulzrinne et.al "Real Time Streaming Protocol (RTSP)", IETF RFC2326 April 1998
- [Li 1998] T. Li et.al "A Provider Architecture for Differentiated Services and Traffic Engineering (PASTE)", IETF RFC2430 October 1998
- [Deering 1998] S. Deering et.al "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", IETF RFC2460 De-

cember 1998

- [Nichols 1998] K. Nichols et.al "Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers", IETF RFC2474 December 1998
- [Blake 1998] S. Blake et.al "An Architecture for Differentiated Service", IETF RFC2475 December 1998
- [Allman 1999] M. Allman et.al "TCP Congestion Control", IETF RFC2581 April 1999
- [Heinanen 1999 a] J. Heinanen et.al "Assured Forwarding PHB Group", IETF RFC2597 June 1999
- [Jacobson 1999] V. Jacobson et.al "An Expedited Forwarding PHB", IETF RFC2598 June 1999
- [Heinanen 1999 b] J. Heinanen et.al "A Two Rate Three Color Marker", IETF RFC2698 September 1999
- [Rosenberg 1999] J.Rosenberg et.al "An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction", IETF RFC2733 December 1999
- [Herzog 2000] S. Herzog "RSVP Extensions for Policy Control", IETF RFC2750 January 2000
- [Rigney 2000] C. Rigney et.al "Remote Authentication Dial In User Service (RADIUS)", IETF RFC2865 June 2000
- [Zorn 2000] G. Zorn et.al "RADIUS Attributes for Tunnel Protocol Support", IETF RFC2868 June 2000
- [Ramakrishnan 2001] K.Ramakrishnan et.al "The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP", IETF RFC3168 September 2001
- [McGregor 1992] G. McGregor "The PPP Internet Protocol Control Protocol (IPCP).", IETF RFC1332 May 1992
- [Bormann2002] C. Bormann "Robust Header Compression (ROHC) over PPP.", IETF RFC3241 April 2002
- [Higashiyama 2000] M. Higashiyama, F. Baker "PPP Bridging Control Protocol (BCP).", IETF RFC2878 July 2000
- [Jeffree 2001] Tony Jeffree, et.al "IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Port-Based Network Access Control", IEEE Std 802.1X-2001 June 2001
- [Lidinsky 1998] William P. Lidinsky, et.al "IEEE Standards for Local and Metropolitan Area Networks: Virtual Bridged Local Area Networks", IEEE Std 802.1Q-1998 December 1998
- [CCITT 1989] CCITT Rec. I.350 "General Aspects of Quality of Service and Network Performance in Digital Networks", International Telecommunication Union, Geneva 89
- [ISO] ISO/IEC 13236, ITU-T Rec. X.641 "Information technology - Quality of Service: Framework", International Telecommunication Union,
- [Campbell 1998] A. Campbell, et.al "A review of QoS Architectures", ACM Multimedia Systems, Vol.6, pp.138-151, May 1998.
- [若宮 2001] 若宮直紀 他 2 名 "ユーザレベルの品質保証を実現する QoS マッピング技術", 電子情報通信学会通信ソサイエティ大会シンポジウム, September 2001
- [Hafid 1998] A. Hafid, et.al "Distributed Multimedia Applications and Quality of Service: a Review", The Electronic Journal on Networks and Distributed Processing, issue 6, February 1998.
- [ITU-T 1996] ITU-T Rec. P.800 "Methods for subjective determination of transmission quality", International Telecommunication Union, Aug 1996

- [ITU-T 1998 a] ITU-T Rec. P.931 "Multimedia communications delay, synchronization and frame rate measurement", International Telecommunication Union, Dec 1998
- [ITU-T 1998 b] ITU-T Rec. P.861 "Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codecs", International Telecommunication Union, Feb 1998
- [Peterson 1998] V.Peterson et.al "Framework for IP performance metric", IETF RFC2330 May 1998
- [ITU-T 1999] ITU-T Rec. I.380 "Internet protocol data communication service - IP packet transfer and availability performance parameters", International Telecommunication Union, Feb 1999
- [Fukuda 1997] Kentarou Fukuda, et.al "QoS Mapping between User's Preference and Bandwidth Control for Video Transport," Proceedings of Fifth IFIP International Workshop on Quality of Service (IWQoS 97), pp.291-302, May 1997
- [Hoffman 1998] D. Hoffman, et.al "RTP Payload Format for MPEG1/MPEG2 Video", IETF RFC2250 Jan 1998
- [Civanlar 1998] M. Civanlar, et.al "RTP Payload Format for Bundled MPEG", IETF RFC2343 May 1998
- [Turletti 1996] T. Turletti, et.al "RTP Payload Format for H.261 Video Streams", IETF RFC2032, Oct 1996
- [Zhu 1997] C. Zhu, et.al "RTP Payload Format for H.263 Video Streams", IETF RFC2190, Sept 1997
- [Finseth 1993] C. Finseth "An Access Control Protocol, Sometimes Called TACACS", IETF RFC1492 July 1993.
- [Kohl 1993] J. Kohl et.al "The Kerberos Network Authentication Service (V5)", IETF RFC1510 September 1993.
- [Postel 1981 b] J. Postel "Internet Protocol", IETF RFC791 Sep-01-1981.
- [Almquist 1992] P. Almquist "Type of Service in the Internet Protocol Suite", IETF RFC1349 July 1992.
- [Yavatkar 2000] R. Yavatkar, et.al "A Framework for Policy-based Admission Control", IETF RFC2753. January 2000
- [Moore 2001] B. Moore, et.al "Policy Core Information Model -- Version 1 Specification", IETF RFC3060. February 2001.
- [Snir] Snir, Y., et.al.: "A Policy Framework QoS Information Model", Internet Draft, IETF.
- [Boyle 2000 a] J. Boyle, et.al "The COPS (Common Open Policy Service) Protocol", IETF RFC2748. January 2000.
- [Boyle 2000 b] J. Boyle, et.al "COPS usage for RSVP", IETF RFC2749. January 2000.
- [Chan 2001] K. Chan,, et .al "COPS Usage for Policy Provisioning (COPS-PR)". IETF RFC3084. March 2001.
- [INTAP 2001] 財団法人情報処理相互運用技術協会 "平成 12 年度 ポリシー・ベース・ネットワーク技術の調査研究報告書", <http://www.net.intap.or.jp/INTAP/information/report.html>
- [Braden 1994] R. Braden, et.al "Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview". IETF RFC1633. June 1994
- [ITU-T 2000] ITU-T Rec. H.323 "Packet-based multimedia communications systems", International Telecommunication Union, Nov 2000

[Handley 1999] M.Handley, et.al, " SIP: Session Initiation Protocol ", IETF RFC2543, March 1999.

[Arango 1999] M.Arango, et.al " Media Gateway Control Protocol (MGCP) Version 1.0", IETF RFC2705, October 1999.

[総務省 2000] 総務省 , “ 「 IP ネットワーク技術に関する研究会」 報告書 ” ,
http://www.soumu.go.jp/s-news/2002/020222_3.html#02, Feb 2000.

[松原] 松原大典 “Network Processor 動向調査報告” , 日立製作所 内部資料