

錯乱円許容量を角解像度 Θ [rad]、ピンホール径を Φ [m]とおくと

$$\Delta D = \frac{2 \tan \Theta}{\Phi} \approx \frac{\Theta}{\Phi}$$

一方で、輝度 L [cd/m²]を持つ物体を観察した時の相対的な網膜照度 I [Td: Troland]は

$$I = R \times \left(\frac{\Phi \times 10^{-3}}{2} \right)^2 \pi \times L$$

R は Stiles-Crowford 効果による補正項で

$R = 1 - 1.06 \times 10^4 \Phi^2 + 4.16 \times 10^7 \Phi^4$ となる。以上から、焦点深度 ΔD と網膜照度 I はトレードオフの関係にあり、小型の光源を用いる RPT では特に重要な問題である。また、実世界と投影画像に輝度の差が存在すると違和感の原因にもなる。投影する画像そのものの輝度を動的に変化させることで輝度補正を行うことも可能であるが、この方法のみでは、プロジェクタの持つダイナミックレンジの一部を補正のために割り当てる事になるため、投影画像のコントラストが低下する。

そこで本研究では、プロジェクタ光学系に対して、口径が可変の絞りを追加し、開口径を動的に制御することで焦点深度と輝度の確保・補正を両立させることを目的とする。

B-2-2 基本原理

再帰性反射材に用いられるマイクロビーズは、光を再帰反射する際ある程度の拡散を生じる。このため、スクリーンが離れるにつれて輝度は減少する。しかし、投影面が離れて無限遠に近くなるにつれて、ピンホールを通さなくても焦点深度は深くなるため、ピンホール部分の開口部を大きく開けて光量を稼ぐことが可能になる。

このピンホールを可変のアイリス絞りに

置き換え、カメラで撮影した画像の輝度から絞り口径を調節する。絞り口径の決定には、投影画像の最大/平均輝度、ダイナミックレンジ、焦点深度等複数の要素が関係してくるが、本報告では試験的実装として光量に余裕の無い小型 HMP の状況を考慮し、提示する画像が目標とする最大の輝度を発揮出来るような口径に絞る方針を採る。

B-3 レジストレーション手法の開発

B-3-1 スクリーン位置の計測手法の必要性和問題点

AR のシステムでは、実世界に対して、適切な位置関係を保持しつつ情報空間の3次元物体提示を維持する為には、提示システムとスクリーンの相対座標に応じて適切に投影映像を再構成必要がある。そのためには、スクリーンの3次元座標を実時間で検出するシステムが必要である。従来の方法では、磁場を用いたポヒマスセンサや超音波センサ、画像認識を用いる方法が挙げられる。しかしポヒマスセンサや超音波センサは、スクリーン内部に電子デバイスを組み込む必要がある。また、これらのセンサは測定環境下の異物、すなわちポヒマスセンサにおいては磁場を乱す磁性体、超音波センサにおいては超音波を反射あるいは吸収してしまう物体などに対し極めて脆弱であり安定した運用に適さない。また、画像認識を用いた手法ではマーカーをスクリーン表面に設置する必要があるため、マーカーそのものの存在が再帰性反射を損ない、投影された映像とマーカーが重畳してしまい、提示すべき情報が遮蔽されてしまう。また、投影された映像によっては画像認識に悪影響を与える可能性がある。スクリーンの形状を平面に限定し、赤外

照明でその輪郭を画像認識させる手法も提案されているが、この方式では任意形状のスクリーンにそのまま応用できるとは言い難い。

B-3-2 提案する手法

先に述べた問題点を解決するため、我々は画像提示部分にスクリーンとマーカの機能を同時に持たせ(1)人間の眼に対してはスクリーンとして、(2)画像認識機器に対してはマーカとして、機能するようシステムを構成する手法を提案する。また、ARシステムとの融和性を高めるため以下にまとめた条件のシステムを構築する。

- (1) スクリーン本体は電源不要、軽量、任意の立体形状にできる
- (2) 信号伝達用あるいは電源供給用のケーブルが不要である
- (3) 同時に複数のマーカの座標取得が可能
- (4) スクリーンとマーカの2重の機能をもたせたデバイスを用いる
- (5) システムに用いる機材が安価・入手容易
- (6) 機材が光学系のものだけでまとめることができ、輝度補正のシステムとの親和性が高い

(1),(2)は、今回のマーカは赤外線、あるいは偏光による物理現象を利用した物でスクリーン表面に何らかの材質で作られたマーカを配置するだけでスクリーンはマーカとしての機能を有するようになる。(3)は複数のマーカをスクリーンにおくことで、一方のマーカがシステムから見えなくなっても他方のマーカが認識を担うという使い方も可能である。(6)の輝度補正システ

ムとは、スクリーンに歪みがある場合やスクリーンとの距離に応じて投射光の輝度を調節することでむらなく、自然な投影像を得るシステムのことである。

(倫理面への配慮)

本年度における本研究は機械的・光学的な要素および理論的要素のみを扱い、研究対象者に対する人権擁護上の配慮、研究方法による研究対象者に対する不利益、危険性の排除や説明と理解(インフォームド・コンセント)に関わる状況、実験動物に対する動物愛護上の配慮などは行う必要がある実験等は一切扱っていない。

C. 研究結果

C-1 絞りをを用いた輝度の動的補正

C-1-1 システム構成

システム構成を図4に示す。絞り(エドモンド社製φ37mmゼロ開口アイリス絞り)を通したプロジェクタ(Epson社製ELP-710、輝度1000[ANSI lm]、水平画角32[deg])画像を、ハーフミラー(エドモンド社製45[deg]入射時50%反射、誘電体蒸着型)を介して再帰性反射材のスクリーンに投影し、投影された画像をプロジェクタと同軸に配置したカメラにより撮影する。撮影画像は解像度320×240、24bitカラー、30fpsを使用した。

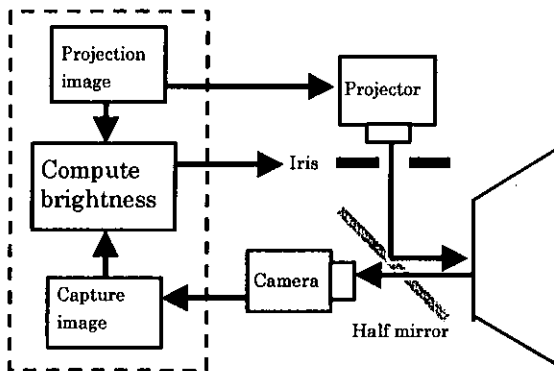


図4 輝度動的補償システム

絞り調節の手順は以下のようになる。

- I.絞りを全開で白色の映像を提示したスクリーンと、白色物体をカメラで撮影し、それぞれ画像内での輝度値を計算する。
- II.何も投影していないスクリーンと、黒色物体をカメラで撮影し、それぞれ画像内での輝度値を計算する。
- III.I、IIより、プロジェクタのダイナミックレンジを計算する。
- IV.画像を投影したスクリーンの最大輝度と、提示する画像が目標とする最大輝度の差分を取り、差分を無くす方向へ絞りの開閉を行う。

C-1-2 システム実装

以下に実験の結果を示す。投影画像としては、現実との輝度差が分かりやすいように現実の背景を撮影したものを用いた。

なお、ダイナミックレンジを大きく取るために、再帰性反射材スクリーンに暗色の物を用いている。投影の様子を図5に示す。右側がφ3mm 固定のピンホール使用時、左側がアイリス絞りによる輝度補正時のスクリーンである。φ3mm のピンホール使用時は、開口径が小さいために光量確保できず、投

影画像がほとんど視認出来ない。アイリス絞り使用時は、輝度が適切に補正された背景画像が提示されているのが確認できる。



図5 輝度動的補償の実現

(左)アイリス絞り (右)φ3mm ピンホール

C-2 レジストレーション手法の開発

C-2-1 システム構成

システムはマーカを設置したスクリーン、スクリーンに投影する為のプロジェクタ、マーカ検出用のビデオカメラ、PC、マーカを照明する専用光源からなる。(図6)

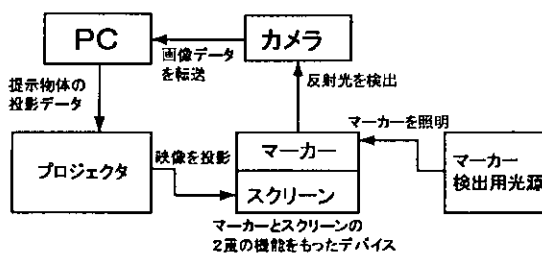


図6 レジストレーションシステム構成

スクリーン上に配置されたマーカの映像はビデオカメラによって撮影、PCに送信されてスクリーンの位置を検出することになる。そしてPCは、そのスクリーン座標に応じた適切な映像のデータをプロジェクタに送り、スクリーンへと投影させる。算出さ

れたスクリーン座標は実際にはカメラ座標系に関するものであるが、今回はユーザの目の座標系からのものとほぼ同一視して構わない。なぜならカメラとユーザの眼は、ほぼ光学共役点に置かれているためである。そのため今回のシステムではユーザの視点は固定であり、固定された位置からスクリーンを覗き込むようになっている。

C-2-2 不可視マーカの実装法

マーカを通常の不透明な素材で作ると、その部分の再帰性反射を損なってしまう。そこで我々は、プロジェクタからの投射光を極力透過させ、再帰性反射を損なわない不可視マーカを実現するための2種類の方法を、以下に提案する。

C-2-2-1 赤外線方式

第1の手法として可視光波長では透過性が高く、非可視光波長（赤外領域）では反射性が高い素材を再帰性反射材に重ねる手法を提案する。すなわち近赤外線は吸収し、可視光極力透過させる素材でマーカを製作し再帰性反射材の上に設置する。カメラと近似的に光学的共役点となる地点から赤外光を投射し、マーカからの反射光を赤外線カメラによって撮影することにより、マーカの検出が可能となる。（図7）

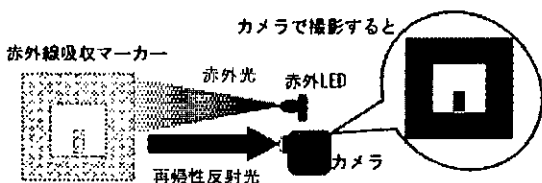


図7 赤外線方式原理図

この方式の特長としてはカメラに可視光カットフィルタを取り付けて撮影することにより、プロジェクタからの投射光はカメラには届かず、またユーザには見えない赤外光を検出に用いることで、マーカ検出光と投射映像がほぼ完全に分離したシステムが構築できる点である。この利点としては、プロジェクタからの投射光による画像認識への影響が避けられることや映像の観察時に障害を起こすマーカ検出光が眼に入らずに済むことが挙げられる。

今回は赤外光を強く吸収する素材として、車窓用の断熱フィルムとして市販されているカーフィルムを使用した。この製品は車の窓ガラスに貼ることで可視光は透過させるが日光の赤外線を遮断し、車内の温度の上昇を防ぐことを目的とする製品である。望ましいフィルムの性能としては、透過率・反射率が赤外照明用LEDのピーク波長である945[nm]付近では極力低く、可視光域380[nm]～780[nm]では逆に高くなる必要があるとされる。今回は該当すると思われる断熱フィルムのうち、アルフォリア・ジャパン（株）社の製品"SC2000"およびアイケーシー（株）社製品"FGR-2500"を用いて実験を行った。以下にその波長ごとの透過特性を示す（図8、図9）。

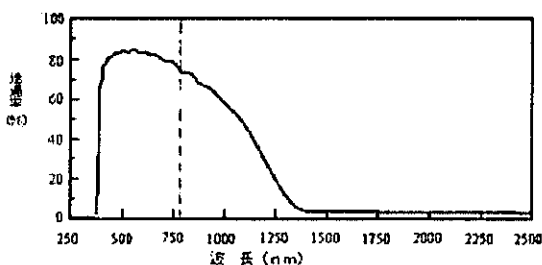


図8 透過特性(SC-2000)

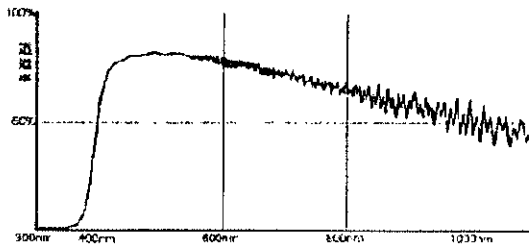


図9 透過特性(FGR-2500)

これらのフィルムの特性より、1300[nm]以上の波長の赤外光を用いるとすると、“SC2000”の場合透過率が約5%に低下する。よって吸収率を0%と仮定しても反射率は95%なので、斜め方向の入射は計算上約2.6%の再帰性反射率となる。これは吸収率を0として考えた値であり、実際にはこの結果より小さい値になりより高いコントラストを得ることが可能であると予測される。しかし1300[nm]までの波長を撮影できるカメラを用意するとどうしても特殊な機材になってしまい、安価なシステムの構築の障害となる。今回、このシステムに想定しているカメラは、1000[nm]前後までの近赤外光を撮影可能なCCDカメラである。波長が1000[nm]前後では透過率は上記の2製品とも約50%であり、先ほどと同様に再帰性反射率の最高値を算出すると約50%となる。これが十分な値かどうかの判断は、以下のように画像認識の手順を考慮して考える必要がある。

C-2-2-2 偏光方式

第2の手法として偏光フィルタを用いる手法を提案する。すなわち偏光版を適切に配置することで観察する視点(眼・カメラ)によって透明・非透明となるよう光学系を設計する。今回は1/4波長板の旋光性を応用し

た透明マーカである。まず、左回り円偏光をマーカ検出光として、カメラと(近似的に)共役点となる地点から投射する。スクリーン表面には1/4波長板をマーカの形状に加工して設置し、検出光の反射を右回りの円偏光板を介して撮影する。波長板の置いていない部分に投射された検出光はハーフミラー、スクリーンと2回反射をして右回り円偏光になった状態でカメラに入射する。一方波長板が置いてある部分に投射された検出光は、上記に加えてさらにπずれるので右回りとなって帰ってくる。両者の光をそのまま観測したのでは輝度にはほとんど差はないが、左回り円偏光板を介して観測すると1/4波長板を置いた部分は光がキャンセルされ、黒く観測されることになる(図10)。なお、ハーフミラーは極力、偏光に影響をおよぼさないものを使用する。

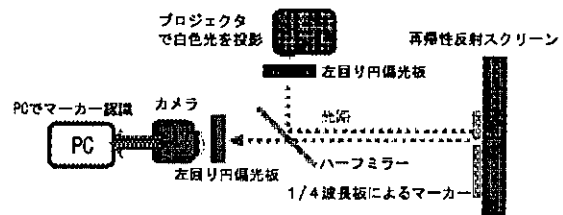


図10 偏向方式構成図

このシステムの特長としては波長板は可視光の透過率が高く、再帰性反射にほとんど影響を与えずに済むという点が挙げられる。ただし、波長板は必ず位相の値に角度依存性があり、検出光の入射角によっては十分なコントラストをとることが困難になる可能性がある。

C-2-3 実験システムの構築

今回使用したマーカのデザインは図1

1 に示す形状をしている。マーカーは 8cm × 8cm の黒枠とその中にある識別用のパターンからなっており、複数の物体提示を行うことができる。赤外線方式、偏向方式の項で述べた素材を加工したマーカーをカメラで撮影したのち、次のような手順でマーカー認識を行う。

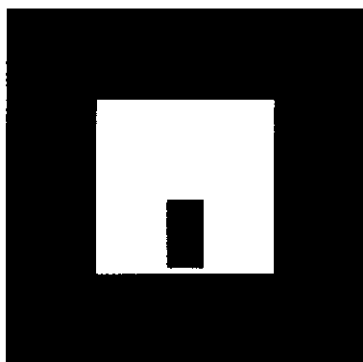


図 1.1 マーカーのデザイン

まず入力画像を一定の閾値によって二値化し、連結領域の面積と外接長方形を求める。次に、面積値によってノイズを除去した後、連結領域の輪郭線追跡を行い、4本の線分によって近似できる領域をコード候補とする。コードの識別は、あらかじめ登録されたパターンとのテンプレートマッチングで行う。本実装では、マーカーの検出および変換行列計算は公開されている ARToolKit のライブラリを利用した。

C-2-3-1 赤外線方式の評価実験

本項では赤外線方式についての評価実験について述べる。用意した断熱フィルム2種類(FGR2500 および SC2000)のうち、どちらがより目的に適しているかを判断する。そのために、フィルムを貼ってない部分と貼ってある部分では角度、距離に応じた輝度信号

の差を赤外光と可視光に分けて測定する。可視光の場合は輝度信号の差が小さいほど色再現性の性能が高く、赤外光の場合は輝度信号の差が大きいほど、マーカー認識の際のコントラストが高く取れることになる。またそれによって、マーカー認識に最適な2値化のための閾値を推定する。

なお、本実験の構成では可視光についてはカメラを介したRGB信号を測定した。本実験で得られたRGB信号をもとにマーカー部の輝度補正も可能である。

まず再帰性反射材を貼った一辺 25cm の正方形のスクリーンを4分割し、2種類のフィルムを反射材の上に貼りこれを実験用のスクリーンとした。赤外線カメラの赤外照明の電源を入れスクリーン全体に当たるように調整した。その後、カメラのレンズとスクリーン中央間の距離を x とし $x=60\text{cm}$, 90cm , 120cm の3つの場合について以下のように計測した。カメラの光軸とスクリーン法線の成す角を θ [deg]とし、 $\theta=0$ [deg]から 60 [deg]まで 10 [deg]刻みに回転させながらビデオカメラから得られるスクリーン上の画像を PC 上で静止画としてキャプチャした。キャプチャした後、スクリーンのフィルムが有無による輝度の比較を行うため、静止画中のスクリーン中央の縦軸に沿った輝度の分布を計測し、フィルムを貼った部分の輝度と貼ってない部分の輝度の平均値の比を求め、距離 x ごとにグラフ化した(図 1.2)。

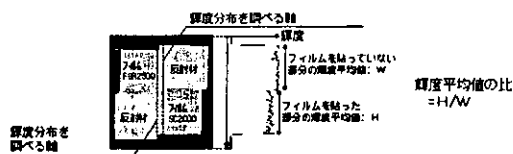


図 1.2 計測の軸

のグラフを図13に示す。

今回、輝度と呼んでいる値は実際にはビデオ信号のRGB値の加重平均で得られるもので、以下のように定義される。

$$lu=0.298912r+0.586611g+0.114478b$$

なお、この輝度信号への変換をYIQ変換と呼ばれる。

実験の結果として FGR2500 の輝度分布

縦軸が輝度の値を示し、0~255の値をとる。なお、横軸は輝度分布を取得した軸上の静止画像上における座標値を示している。

このグラフ全ての中央付近に急激な変化があるが、これがフィルムを貼ってある部分と貼っていない部分の境界である。

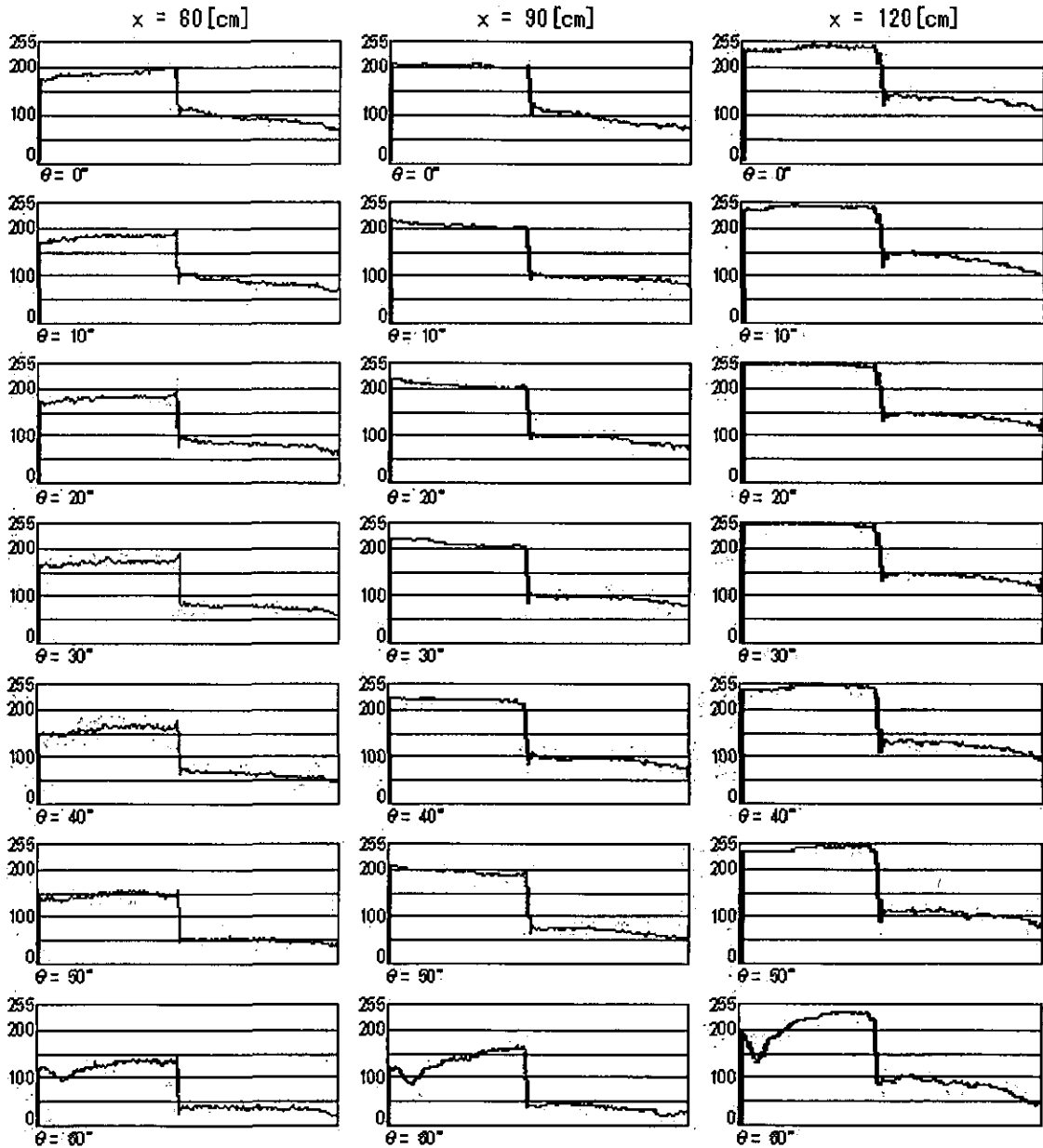


図13 試料 FGR2500 における赤外光反射の輝度分布

フィルムを貼った部分の再帰性反射率のグラフを図14に示す。グラフ横軸がスクリーンの角度 θ [deg]、縦軸が輝度比[%]を意味している。図14で枠内にある60,90,120cm というのはカメラ-スクリーン間距離 x の値を示しており x の値ごとにグラフを色分けして示してある。図中の枠内で例えば"60cm(FGR2500)"などとあるのは、FGR2500 を貼った部分でカメラ-スクリーン間距離が 60cm のときのデータを意味する。他も表記も同様である。

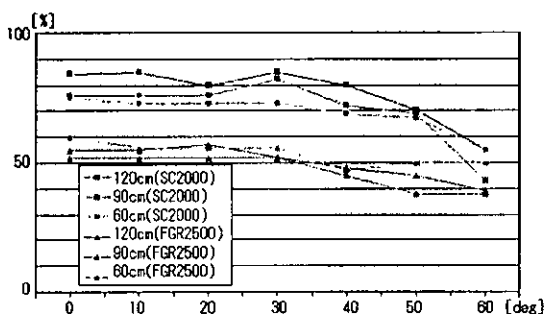


図14 赤外反射光輝度の距離角度依存性

結果から言える事は、FGR2500の方がSC2000より全ての θ 、 x において輝度比が低いという点である。これは、FGR2500の方がSC2000より赤外光の吸収性能が強いことを示す。さらに、どちらのフィルムとも、 θ が大きくなるにつれ輝度比がすこしずつ低下している。また、図14では $x=120$ [cm]においては $x=60,90$ [cm]のときと比較して全体的に輝度が高くなっている。これは赤外照明とカメラは厳密には光学共役の関係になっていないため、ある程度カメラ-スクリーン間の距離が小さいと、反射材からの拡散光が十分には届かないためと推測される。

続いて可視光の輝度信号の測定を図15

に示す装置においてプロジェクトにRGB信号((255,0,0) (0,255,0) (0,0,255))および白色光(255,255,255)の赤、緑、青、白の色を投影させ、赤外光の実験と同様の角度、距離で画像をキャプチャした。

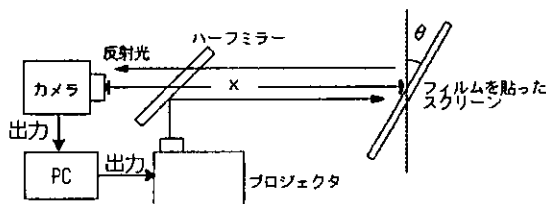


図15 可視光反射輝度計測法

その後画像中のRGB信号の値、あるいは白色光の場合は赤外光と同様にYIQ変換で得られる輝度信号から得られる輝度(RGB信号の)平均値の比のグラフを赤外光の実験と同様に作成した。フィルムの種類は各々のグラフ上部に記してある。なお、本実験でキャプチャに使用したカメラはソニー製DVのDCR-TRV900である。RGB信号および白色光の場合ごとに、"FGR2500"と"SC2000"の結果を並べて図16～図19に輝度比のグラフを示す。

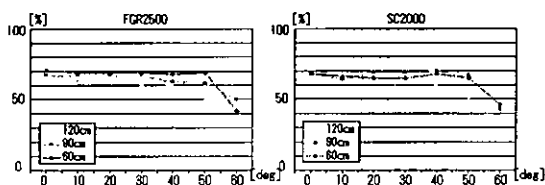


図16 赤色光反射輝度

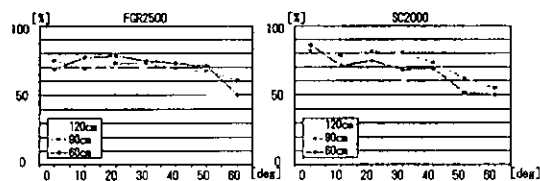


図17 緑色光反射輝度

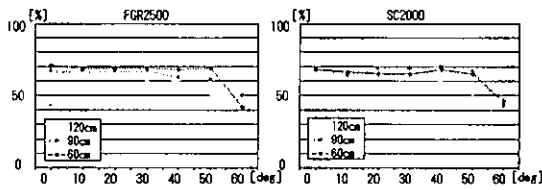


図 18 青色光反射輝度

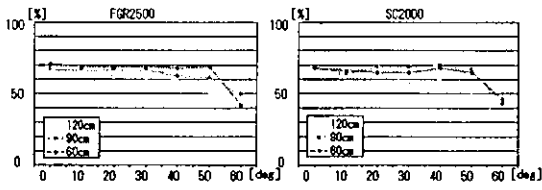


図 19 白色光反射輝度

これら全てのグラフは θ が $60[\text{deg}]$ になったところで、輝度比が全体的に低下している。これは赤外光の実験と同様であり、再帰性反射材の角度に関する反射性能の限界が原因と考えられる。2種類のフィルムの輝度分布を距離、角度が等しい条件で比較してみると、条件によってはわずかにSC2000の方が輝度比が高くなっているが、ほぼ2つのフィルムに目立った違いはないとみてよい。FGR2500によるマーカを取り付けたスクリーンに映像を投影した写真を図20に示す。

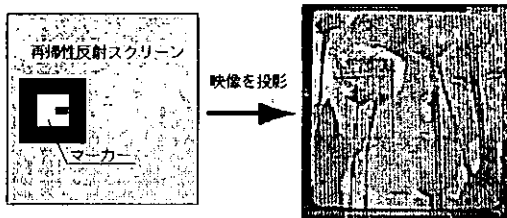


図 20 赤外線方式による画像提示

最後に赤外線方式によって実際にマーカを認識しそれにもとづく3次元物体の提示が可能であるかを確認する。

図21で示されるシステムを構築して実験した。図中の立体スクリーンとは、表面に再帰性反射材を貼り付けた一辺25cmの発泡スチロール製の立方体である。なお、カメラは赤外光と輝度測定に使用したものと同様の赤外線カメラを使用した。

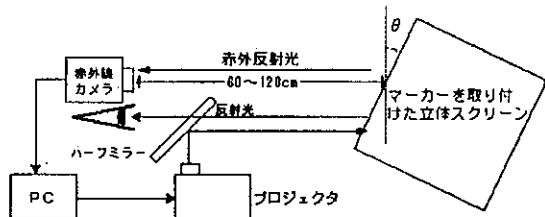


図 21 赤外線方式実証システム

カメラとユーザの目の位置はごく近い物にし、カメラの光軸とハーフミラーで反射した投射光の光軸ができるだけ平行になるようにした。カメラとスクリーン間の距離を60cm以上に保ち、スクリーンを図の方向に回転、あるいはカメラ光軸に垂直な方向へ平行移動させるなどしてスクリーン中に提示された物体がどの角度までスクリーンの動きを追従するか確認した。

提示された3次元物体(青いポット)の様子を図22に示す。写真を図中の矢印のとおり左から右へ、上から下に沿って見るとポットがスクリーンを追従している様子がわかる。カメラとスクリーン間の距離が $x=60\text{cm}$ 以上で回転角 θ が $10\sim 50[\text{deg}]$ までなら認識にほぼ成功し、青いポットが、あたかも立体スクリーン内部に存在しているかのように立体スクリーンの動きを追従した映像が提示された。

ただし、 θ が $0\sim 10[\text{deg}]$ 付近ではマーカ表面にハイライトが発生し、認識が不可能になることがあった。またスクリーン(マ

ーカー) は静止している間にも、算出されたマーカー座標の小規模な変動が定期的な続くことがあった。

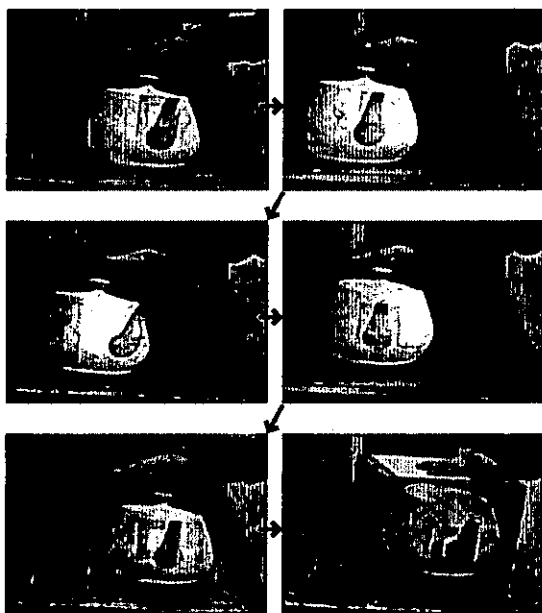


図 2 2 レジストレーション実証

C-2-3-1 偏光方式の評価実験

本項では、偏光方式の実験について述べる。まず、使用した機材等についてのデータを以下にあげる。

- DMD プロジェクタ PLUSvision 製 型番 V-1080
- ビデオカメラからの映像は USB キャプチャユニット (USBCAP:アイオーデータ社製) で PC に取り込んだ
- 使用した再帰性反射材は、反射輝度が最も高いアルミ蒸着によるものである
- ハーフミラーはエドモンド社製の誘電体蒸着によるもので、45[deg]入射時に透過率 50% 反射率 50%
- スクリーンの撮影にはソニー製 DV の DCR-TRV900 を用いた

まず、再帰性反射材上に 1/4 波長板を固定して、実験用スクリーンを製作した。

図 2 3 のような構成で、波長板の輝度差測定を行った。

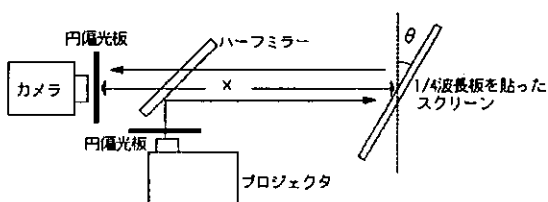


図 2 3 偏光方式の輝度測定実験

まずはマーカーとなるべき、すなわち再帰性反射を阻害する能力について検証した。使用した円偏光板は左回りのものを用いた。PC で白色光 (RGB 信号が全て 255) をプロジェクタに投影させ、白色光源とした。スクリーンの静止画をキャプチャし、スクリーン中央付近の輝度分布を調べ、赤外方式の実験と同様に波長板を貼った部分と貼らない部分の輝度比を計測した。(図 2 4)



図 2 4 計測の軸

輝度比測定の実験結果を以下に示す(図 2 5)。比較しやすいように赤外方式の赤外光による結果(断熱フィルム FGR2500 による結果)も同一グラフ上に並べて示してある。

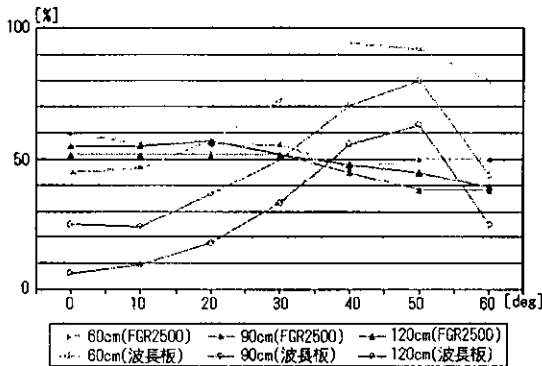


図 2 5 偏光方式の輝度測定結果

グラフを見ると、 θ が 20[deg]を超えなければ赤外方式に比較して輝度比が非常に小さいものが多い。波長板の部分の輝度は最小で 7%を下回る値をとっている。しかし、角度に関しては θ が 20[deg]を超えはじめると急激に輝度比が上昇している。これは波長板でずらす位相の値が入射角によって異なることによるものである。再帰性反射材の反射能力が急激に低下する角度より小さい角度で、波長板の輝度比が低下しているのは赤外方式と比較して大きな問題点である。実際には輝度比が低下している部分の波長板は青緑～黄色を呈していた。これは、入射角によっては一部の波長の光の位相が理論どおりに変化しないことが原因であると考えられる。

引き続きスクリーンとなるべき、すなわち再帰性反射をなす能力について検証した。図 2 3 の装置において、フィルムを貼ったスクリーンの代わりに波長板を貼ったスクリーンを用い、赤外方式の実験と同様に可視光（赤、緑、青、白の色）の反射光による各信号および輝度の比をグラフ化した。なお、本実験でキャプチャに使用したカメラはソニー製 DV の DCR-TRV900 である。

結果を図 2 6 に示す。比較しやすいように赤外方式で用いたフィルム FGR2500 の結果と同一グラフ上に並べて示してある。赤外方式の断熱フィルムに比較すると、波長板は全ての色に渡って輝度比が高い。すなわち、色の再現性能が高いといえる。これは波長板が原理的には光の吸収を行わない性質を持つことに起因している。

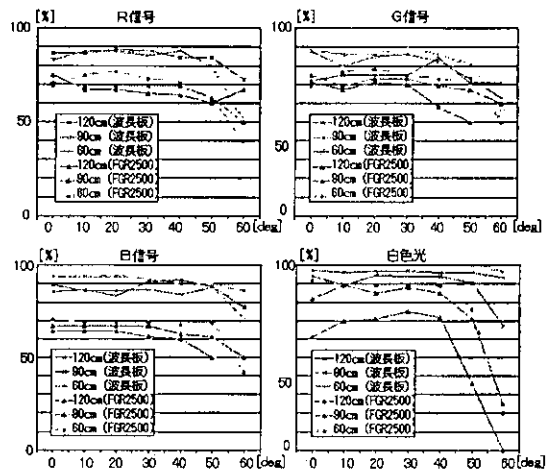


図 2 6 偏光方式の可視光の輝度

D. 考察

D-1 絞りをを用いた輝度の動的補正

RPTにおける投影画像の品質を改善するために、スクリーン輝度と焦点深度の両立と言う観点から、プロジェクタ系に可変のアイリス絞りを追加した光学系の提案を行い、有効であることを確認した。今後は、動的にスクリーン距離や形状が変化する場合への対応、前報での提示画像補正による輝度補正との併用を行い、さらなる品質向上を目指す予定である。

D-2 レジストレーション手法の開発

RPTの実現において極めた重要なレジストレーションを、画像提示部分にスクリー

ンとマーカーの機能を同時に持たせ (1) 人間の眼に対してはスクリーンとして、
(2) 画像認識機器に対してはマーカーとして、機能するようシステムを構成する手法として赤外線方式と偏光方式を提案し、それぞれの有用性を検証した。この検証過程を通して明らかとなったいくつかの問題について以下の考察する。

D-2-1 フィルム性能の比較と閾値の決定の必要性

今回画像認識においては、まず始めに得られた画像中の輝度信号と一定の閾値を比較し、閾値より高い画像を白(RGB 信号で(255,255,255))に、低い画像を黒(RGB 信号で(0,0,0))に変換する。そこから得られた画像を元に認識を行うので、フィルムを貼った部分と、貼らない部分の輝度分布が入射角・カメラ・スクリーン角に依存しなければ認識を常に行うことが可能になる。しかし、実際には再帰性反射材は入射角が大きくなると再帰性反射能力が低下する。また、再帰性反射率の値は入射角・カメラ・スクリーン距離によって極力変化しないことが望ましいが、フィルムの反射率、透過率は一般にはそれらのパラメータに依存する。以上の議論から、前述した2種類のフィルムによって得られる輝度分布を入射角・距離ごとに調べ比較し、またそれに基づく理想的な閾値を求める必要がある。

D-2-2 輝度信号測定実験の考察

断熱フィルム2種類についての以上の実験結果から、FGR2500を用いて輝度信号の2値化の閾値を125~150程度の値にしておけばマーカー認識が0[deg]~

40[deg],0[deg]~50[deg]なら認識が可能であることが判明した。認識可能な最大角を60[deg]以上にするには、120cm以上カメラとスクリーンの距離を置く必要があると考えられる。これらの角度は立体にマーカーを複数つけて用いることを前提として考えれば、十分な角度であり実用に耐えうる。前述したように赤外照明が厳密にはカメラと共役点にはなっていないのが原因であり、より赤外照明とカメラの距離を小さくするなどの対策が必要である。SC2000の方は可視光域においてはFGR2500より透過率が高く、色再現性の性能はやや高い反面赤外光における吸収率が低く認識目的には実用的ではない。

D-2-3 最適な輝度信号値への変換法

今回我々は画像認識において、画像中のRGB信号をYIQ変換を用いて変換した輝度信号の値で2値化を行った。これは人間の感度特性に合わせて定義された変換である。しかし、実験に用いた赤外線カメラは輝度が高い部分は白く、輝度の低い部分は緑色に近い色になる。これは、カメラの特性によるものであり、YIQ変換による輝度信号より緑の補色に近い赤色を担うR信号を基準に2値化を行ったほうがコントラストを高くとることが可能である。また偏光方式の波長板についても、実験結果からスクリーン角度が20[deg]を越えたあたりから波長板の部分が一部の波長の光をキャンセルしきれずに黄色くなってしまい実用上問題になるほどコントラストが下がっている。これも、黄色の補色である紫に近い色を担うB信号についての2値化を行うと、コントラストを高く取ることが可能で

ある。

以上の議論から、マーカ－の方式やカメラ特性に合わせた変換法を用いれば、YIQ変換を用いる認識より、より広範囲での認識率の向上が望める可能性がある。

D-2-4 偏光方式：波長板マーカ－について

実験結果や前述した考察から、条件によっては非常に高いコントラストを達成でき、また赤外方式より可視光の再現性能が高いという優れた特長をもつことがわかった。しかし、偏光方式には以下のような問題がある。

まず、検出光が可視光であるため、無関係な外光からの影響を受けやすい点である。

これを防ぐには、外光より強力な光源を用いる必要であるが今回のように単純な光源としてプロジェクタを一台使用してしまうのは実用的ではない。また、使用する波長板によってはハイライトが発生し、認識に障害が生じるという問題もある。さらに、今回のシステムでは検出用の光源をカメラの近くに置いている。これはすなわち、ユーザの目のそばを光源から出た検出光が通過することになる。眼に高輝度な検出光が入るとユーザは眩しくなり、映像も見づらくなるという問題が生じる。回避策としてはカメラおよび光源を眼から離せばよいが、カメラとユーザの眼を離すとスクリーンへの提示物体の位置合わせが不正確になることがわかっている。これを解決するには赤外線を用いた偏光方式を用いること、などが挙げられる。

D-2-5 今後の展望

今後の展望としては、より角度・距離に

関してロバストな認識ができるような改良法が挙げられる。その為の手法としては、根本的な認識アルゴリズムの改良の他に前章で述べた輝度信号の変換法の改良、複数のマーカ－の使用、および赤外線の偏光方式を用いたマーカ－システムなどが挙げられる。特に赤外線の偏光方式は本研究で提案した2つの方法の長所を併せ持つ方式といえる。

さらに今回使用したマーカ－は平面の上のみ設置できるデザインであったが、完全な任意形状のディスプレイ構築の為には、球などの曲面をもつスクリーンにも設置できるマーカ－が必要である。その解決策としては、今回提案した赤外方式のより巧みな方法としてディスプレイ内部にマーカ－を埋め込む手法が考えられる。表面を赤外線は透過し、可視光は反射する再帰性反射材で表面を覆ってディスプレイとし、内部に光を吸収する素材で作られた黒いマーカ－を組み込むことが考えられる。

これを赤外線カメラで撮影すれば、表面の反射材は赤外線を透過するので内部に組み込まれた光を吸収するマーカ－が撮影できることになる。勿論、このような立体スクリーンは可視光に対しては通常の再帰性反射スクリーンとなんら変わらなく扱えることができ、完全に人間の目には見えないマーカ－が構築できるという大きな利点もある。赤外線のみを透過する再帰性反射材については、赤外線のみを透過する鏡であるコールドミラーに用いられている技術を応用すれば、製作は可能であると思われる。

E. 結論

RPTにおける投影画像の品質を改善する

ために、スクリーン輝度と焦点深度の両立
と言う観点から、プロジェクタ系に可変の
アイリス絞りを追加した光学系の提案を行
い、有効であることを確認した。

また、今回我々が製作したレジストレー
ションの中で、実用に値すると判断された
のは断熱フィルムを使用した赤外線方式で
あった。それを用いた提示実験により、マ
ーカーかつ立体スクリーンの2重の機能を
持つ電源不要なデバイスが達成できたとみ
なして良い。なお、今回提案した方式の中
で使用した機材はいずれも安価・入手容易
なものであり、当初の目的は達成したこと
を確認した。

F. 健康危険情報

該当なし

G. 研究発表

- 論文発表
現在準備中
- 学会発表
現在準備中

H. 知的財産権の出願・登録状況

- 特許取得
着座式画像表示装置（予定）
- 実用新案登録
なし
- その他
なし

研究要旨

本研究では、より簡便で安全な早期胃癌に対する切開・剥離 EMR のための内視鏡手術器具開発を分担研究として行う。本年度においては、これまでの切開・剥離 EMR の成績より、その問題点を明らかにし、簡便で安全な切開・剥離 EMR のための内視鏡手術器具開発の方向性を探索した。切開・剥離 EMR により、従来法に比較し良好な一括かつ断端陰性率が得られていた。しかし、U あるいは M 領域の病変、大きな病変や潰瘍所見を有する病変では、十分な成績とは言えず改善の必要性が残されていた。120 分以上長時間要していた病変は、それらと一致し、現状の内視鏡システムによる切開・剥離 EMR では難易度の高い病変であると考えられた。また、出血・穿孔の偶発症も改善していくべき今後の課題として挙げられた。以上の問題点は、視野確保から切開・剥離、さらに止血操作などまですべて 1 本の内視鏡によってしか施行できない現状の内視鏡システムによると推測され、これらを解決するために、外科手術に近い視野および操作性を有する内視鏡手術器具の開発が必要であると考えられた。

A. 研究目的

早期胃癌に対する内視鏡的粘膜切除術（Endoscopic Mucosal Resection: EMR）はその良好な QOL から飛躍的に普及している。また最近では治療対象となる早期胃癌病変の適応の拡大が論じられ、多数の外科切除症例の検討に基づき、リンパ節転移の可能性がほとんどない大きな病変や潰瘍癒痕を伴う病変に対しても適応拡大を図っている。一方で、EMR の対象症例は本来外科的切除により根治が期待される症例であり、EMR 後に治癒切除基準外であった病変に対しては適切な追加治療がなされなければならない。術前診断精度の限界を考慮すると、正確な病理学組織学的検索が必須であるが、そのためには分割切除より一括切除が望ましいのは当然である。従来の strip biopsy 法や EMRC 法などでは、技術的に大きな病変や潰瘍癒痕を伴う病変に対する一括切除は困難なことが多く、適応拡大は困難であった。そこで我々は、高

周波針状ナイフの先端に絶縁体であるセラミック性の小球を接続することにより、粘膜切開・粘膜下層剥離が容易にかつ安全に施行可能となった IT（Insulation-Tipped）ナイフを開発し、1996 年より臨床応用している。近年、IT ナイフを用いた EMR は切開・剥離法としてその手技が確立され、大きな病変や潰瘍癒痕を伴う病変に対しても高い一括切除率が得られるに至り、技術的にも EMR の適応拡大が可能となってきている。

しかし、IT ナイフを用いた切開・剥離 EMR は、操作性の困難性や出血・穿孔などの偶発症の問題点から、現時点では限られた専門施設でのみ行われており一般臨床への普及には至っていないのが現状である。全早期胃癌症例に占める割合は、胃癌学会ガイドラインの適応基準では約 8%であるのに対し、適応拡大基準では約 28%に昇ると推定される。一般病院においても大きな病変や潰瘍所見を有する病変に対して技術的に一括切除可

能であれば、より多くの早期胃癌症例が低侵襲で良好な術後QOLが得られるEMRでの治療が可能になり、医療の効率化や医療費の削減に寄与すると考えられる。

本研究では、より簡便で安全な切開・剥離EMRのための内視鏡手術器具開発を分担研究として行う。本年度においては、これまでの切開・剥離EMRの成績より、その問題点を明らかにし、簡便で安全な切開・剥離EMRのための内視鏡手術器具開発の方向性を探索する。

B. 研究方法

2000年1月から2003年12月までにEMR術前の当院適応基準（①生検で分化型腺癌、②明らかな粘膜下層浸潤所見なし、③潰瘍のない病変は腫瘍径に制限なし、潰瘍のある病変は腫瘍径30mm以下）を満たし、切開・剥離EMRが施行された早期胃癌945例（平均年齢；67歳、男女比；764/181）、1033病変を対象に、一括かつ断端陰性切除率、施行時間および出血、穿孔の合併症について検討した。

C. 研究結果

一括かつ断端陰性率は93%(957/1033)とであり、部位別にはU領域；88%(155/176)・M領域；91%(394/431)・L領域；96%(408/426)、大きさ別には2cm以下；95%(686/719)・2.1～3cm；90%(158/176)・3cm以上；82%(113/138)、潰瘍所見(UL)の有無別にはUL(-)；94%(741/790)・UL(+);89%(216/243)であった。

平均施行時間は78分(10-540分)で、その内訳は30以内；20%(207/1033)・31分～60分；39%(398/1033)・61分～120分；27%(281/1033)・121分以上；14%(147/1033)であった。121分以上を要した病変はU領域；19%(34/176)・M領域；18%(77/431)・L

領域；8%(36/426)と有意にUあるいはM領域に、大きさ2cm以下；9%(62/719)・2.1～3cm；18%(32/176)・3cm以上；38%(53/138)と有意に3cm以上に、UL(-)；12%(98/790)・UL(+);20%(49/243)と有意にUL(+に多くかった。

出血に関しては、術中出血を推定するEMR前後で2mg/dl以上のHb値低下は7%(63/945)、EMR後に出血を認め緊急内視鏡的を要した症例を6%(59/945)に認めた、全例内視鏡的に止血が可能で保存的に軽快した。術中出血はU領域；8%(14/176)・M領域；8%(35/431)・L領域；3%(14/426)と有意にUあるいはM領域に、大きさ2cm以下；4%(32/719)・2.1～3cm；8%(14/176)・3cm以上12%(17/138)と有意に3cm以上に多かった。ULの有無には有意な差は認めなかった。術後出血はU領域；1%(1/176)・M領域；6%(27/431)・L領域；6%(31/426)と有意にMあるいはL領域に多かった。大きさおよびULの有無には有意な差は認めなかった。

穿孔は4%(35/945)に認めた。一例を除き全例内視鏡的に穿孔部の閉鎖が可能であった。穿孔例はU領域；7%(13/176)・M領域；4%(16/431)・L領域；1%(6/426)と有意にUあるいはM領域に、大きさ2cm以下；3%(18/719)・2.1～3cm；3%(6/176)・3cm以上；8%(11/138)と有意に3cm以上に、UL(-)；3%(21/790)・UL(+);6%(14/243)と有意にUL(+に多くかった。

D. 考察

当院における従来のEMR法(strip biopsy法)一括かつ断端陰性切除率は、2cm以下、2.1-3cm、3.1cm以上の一括かつ断端陰性切除率は、それぞれ45%(172/386)、24%(8/34)、0%(0/10)と大きな病変に対して一括切除は困難であり、さらに2cm以下の病変においても約半数が分割での切除となっている。それに対し、今回検討した2000年1月から2003年12月までの切開・剥離EMRの一括かつ断端陰性率は93%(957/1033)と極めて良好な成績を示していた。しかしながら、UあるいはM領域の病変ではそれぞれ88%と91%、3cm以上の大きな病変は82%、潰瘍所見を有する病変では89%と、まだ十分な成績とは言えず改善の余地が残されている。また、施行時間の検討では、120分以上長時間要している病変は、UあるいはM領域の病変、大きな病変や潰瘍所見を有する病変に多く、一括かつ断端陰性率がやや低い病変と一致していた。これらは、現在の内視鏡システムによる切開・剥離EMRでは、難易度の高い病変であると考えられた。

出血・穿孔の偶発症に関しては、穿孔による一例の手術例を除きいずれも内視鏡的止血やクリップ閉鎖にて全例保存的に軽快しているが、改善していくべき今後の課題と考えられた。また、穿孔・出血のリスクファクターは難易度の高い病変にほぼ一致していた。

一方、ITナイフを用いた切開・剥離EMRは、良好な視野を確保し、切除面に対して適切なtensionを保ちつつ切開・剥離することが最も重要なポイントである。しかし、現行の内視鏡システムでは視野確保から切開・剥離、さらに止血操作などまで1本の内視鏡によってすべて行っているため、非熟練者にとって、あるいは難易度の高い病変では、視野

確保や適切なtensionを保つことが困難となり、長時間を要し、確実な一括切除を困難にしていると考えられる。いわば外科医が右手一つで手術操作を行っている様なものである。良好な切除視野を確保するための補助内視鏡として既存の細径内視鏡を切開・剥離を行う内視鏡と同時に経口的に挿入した試みでは、2本の内視鏡の操作性は独立性に乏しく、補助的な効果は得られなかった。したがって、今回の検討で得られた難易度の高い病変に対してもより簡便で安全な切開・剥離EMRを行うためには、外科手術に近い視野および操作性を有する内視鏡手術器具の開発が必要であると考えられた。具体的には、内視鏡処置具が挿入可能な2本の内視鏡(子内視鏡)が経口的にdelivery system(親内視鏡)を通じて胃内へ同時に挿入され、その2本の子内視鏡がそれぞれ独立した操作性を有する親子内視鏡システムの開発が必要であると考えられた。

E. 結論

早期胃癌に対する切開・剥離EMRの成績より、その問題点を明らかにした。切開・剥離EMRにより、従来法に比較し良好な一括かつ断端陰性率が得られていたが、難易度の高い病変では改善の必要性があり、出血・穿孔の偶発症も改善していくべき今後の課題である。これらを解決するために、外科手術に近い視野および操作性を有する内視鏡手術器具の開発が必要であると考えられた。

F. 健康危険情報

特記すべきことなし。

G. 研究発表

1. 論文発表

1) Eguchi T, Gotoda T, Oda I, et al. Is one-piece resection essential for endoscopic gastric mucosal resection? Digestive Endoscopy 15: 113-116, 2003.

2) 小田一郎, 他. ITナイフを使用したEMRにおける出血・穿孔. 消化器内視鏡 15: 1388-1390, 2003.

2. 学会発表

1) 小田一郎, 他. 早期胃癌に対するEMRの適応拡大の妥当性: EMR後の成績から. Gastric Cancer 学会抄録: 102, 2003.

2) 小田一郎, 他. 早期胃癌に対するEMRの適応拡大: EMR後の成績から. Gastroenterological Endoscopy 45 Suppl.1: 505, 2003.

3) 小田一郎, 他. ITナイフを用いた内視鏡的粘膜切除術の現状と問題点. Gastroenterological Endoscopy 45 Suppl.2: 1522, 2003.

4) Ichiro Oda, et al. A novel endoscopic mucosal resection technique for early gastric cancer: Submucosal dissection method with an insulation-tipped (IT) knife. Gut 52 Suppl. 2: A43, 2003.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得

なし。

2. 実用新案登録

なし。

3. その他

なし。

以上

前立腺がんの手術治療の開発

分担研究者 藤元博行 国立がんセンター中央病院泌尿器科医長

研究要旨

神経温存を望まない、あるいは温存不可能と判断された局所進行がんに対して広汎前立腺切除法を開発しこれを施行してきた。これまでの検討で本手術法は一般的に手術の適応外とされる症例に対しても75%の手術単独治療成功率を確保している。また一般的な手術適応とされる症例に対する手術法の違いは優位に治療成績が良好であることを確認するに至っている。この手術療法が本研究により、前立腺全摘の比較的初心者にも安全、確実に施行できるかどうかを検討する。

A. 研究目的

前立腺を広汎に切除する術式が治療成績の向上につながるかどうかを検討した。

B. 研究方法

2000年からは術後即時内分泌療法を中止したことにより、真に手術療法の正否の判定が可能となった。今回、本術式の真の適応であるStage C前立腺癌に対する治療成績の分析を行った。

2000年1月から2003年7月までにStage C前立腺癌に対して一定期間の内分泌療法のうち、43例に本術式を適応した。これらの症例は全例即時内分泌療法を施行していない。同時期に従来の方法で施行された前立腺全摘を施行されたStage C前立腺癌72例の治療成績を比較した。

C. 研究結果

PSA failure >0.2 をeventとしてブランマイア法で治療成績を比較したところ、2年

非再発率は拡大切除が95%、従来法では70%であり $p=0.036$ をもって優位に良好であった。多変量解析で検討したところ、手術法の違いは $p=0.079$, Hazard 3.88であり、T3a vs T3b $p=0.064$, Hazard 2.42, Gleason score $7>$ vs $7<$ で $p=0.114$, Hazard 5.76であり、多変量解析においても手術療法の違いが重要な予後因子であることが確認された。PSA failureを来したStage C症例は2例であり、1例はリンパ節転移陽性であった。

D. 考察

リンパ節転移陽性症例ではさすがに局所を広汎に切除しても治療不成功になる可能性が高いと判断されるが、他は広汎な切除により治療成績が向上されるものと思われた。

E. 結論

局所進行がんに対して広汎切除を行うことは明らかに治療成績の向上につながることが証明された。従ってこのような手

術療法が何らかの方法、情報により初心者でも安全、確実にできるかどうかを検討する必要がある。

2004.3

H. 知的財産権の出願・登録状況
なし

F. 健康危険情報

なし

G. 研究発表

1. 論文発表

- 1) Fujimoto H, Okajima E, Kawashima K and Kakizoe T: Clinicopathological statistics on registered prostate cancer patients in Japan: 2,000's report from Japanese Urological Association. Int. J. Urol. : 2004 in press
2. 学会発表
 - 1) 藤元博行: 恥骨後式前立腺全摘除術. 第3回東北前立腺癌臨床課題研究会, 2003.3
 - 2) 藤元博行, 込山元清, 佐藤仁彦, 中川徹, 垣添忠生: 神経温存を意図しない前立腺広汎切除術 その手技. 第91回日本泌尿器科学会総会, 2003.4
 - 3) 藤元博行: 術前内分泌療法を併用した前立腺全摘. 第10回東京前立腺癌フォーラム, 2003.10
 - 4) 藤元博行: 早期前立腺癌に対する治療「恥骨後式前立腺全摘」. 第68回日本泌尿器科学会東部総会, 2003.10
 - 5) 藤元博行: 局所限局あるいは局所進展前立腺癌に対する治療戦略-手術、放射線治療の役割と治療の個別化-「術前内分泌併用による根治的前立腺広汎全摘」. 第41回日本癌治療学会総会, 2003.10
 - 6) 藤元博行: 局所進行前立腺癌に手術の夢はある. 近畿前立腺腫瘍研究会,