

医療用局部 X線遮蔽装置の開発

小泉 洋人* 小野 洋伸** 長山 忠司**

1. はじめに

医療用の血管撮影装置 (X線診断装置) (図 1) は患者の診断だけでなく、最近ではカテーテルという血管内挿入器具による手術時にも使用されている。しかし、カテーテルによる頭部の手術時には患者の眼球部に多量の X線が照射され、白内障を引き起こす危険性が懸念されている。

本開発では医療現場で使用されている血管撮影装置に、簡単に後付け搭載することが出来る患者の眼球部を保護するための X線遮蔽装置について、下記の内容を目標に試作機を開発することとした。

<開発目標>

- ・ 医療現場で使用されている血管撮影装置に後付けできる、小型軽量で安価な遮蔽装置本体と制御装置を開発する。
- ・ 遮蔽対象(眼球部)を確実に自動遮蔽するために、画像処理による三次元画像計測精度の向上と遮蔽体の位置決め動作制御を最適化して追従安定性の向上を図る。
- ・ 血管撮影装置に搭載して遮蔽効果の性能テストを行う。



図 1 血管撮影装置

2. 開発内容

2.1 システム構成

ハードウェア構成を図 2、ソフトウェア構成を図 3 に示す。

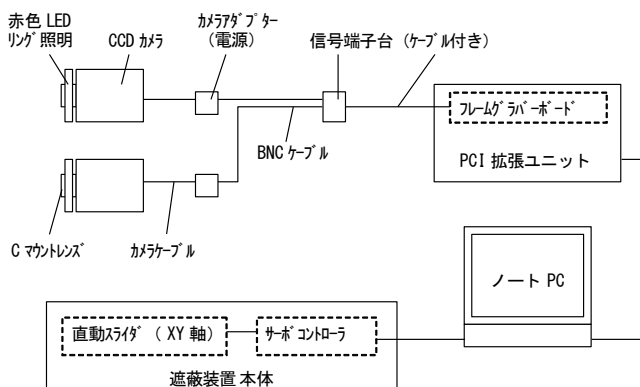


図 2 ハードウェア構成

制御プログラム		ユーザーアプリケーション コンパイラ
Microsoft Visual C++		
サーボモーター制御用 シリアル通信コマンド	画像処理ライブラリ (Vision 開発モジュール)	ライブラリ
Microsoft Windows XP		OS

図 3 ソフトウェア構成

図 2 の様にハードウェアは、眼球位置を計測するステレオカメラ (2 台の CCD カメラで構成)、遮蔽板を位置決めする遮蔽装置本体、および画像処理と位置決め制御を行う制御用ノート PC から成る。

CCD カメラはモノクロアナログカメラが 2 台あり、4ch マルチプレクサ入力フレームグラバボードで画像データを取り込む。

制御用 PC はノート型なのでフレームグラバボード (PCI ボード) を増設するために、PCMCIA (PC Card) 対応の PCI 拡張シャーシを使用した。

ソフトウェアについては、windows 上でプログラムを動作させることを前提に Microsoft Visual C++ でプログラム開発を行った。また、画像処理ライブラリはこれまでに使用経験のある National Instruments の Vision 開発モジュールを使用した。

2.2 遮蔽装置本体と制御系の開発

遮蔽装置本体 (図 4) の設計、製作は関東技研が行い、当センターは直動スライダの制御系開発を担当した。

遮蔽体を位置決めする動作機構については、小型軽量かつ安価な装置とするために汎用の DC ブラシレスモーター+ボールねじ駆動による直動スライダを採用することとした。遮蔽板を保持する材質は、X線撮影の障害とならずかつ軽量の薄いアクリル板を使用した。この結果、遮蔽装置本体の質量を約 4kg に抑えることが出来た。

制御系の開発にあたり、まず、安価なエンコーダなしの DC ブラシレスモーターを使用して高精度な位置決め制御が可能か実験を行った。実験の結果、回転方向の情報を持たない回転パルスの取得だけでは、往復動作を繰り返しているうちにパルスのカウント漏れによるズレが蓄積し厳密な位置決めが難しいことが分かった。このためエンコーダ (A 相 B 相出力) 付き DC ブラシレスモーターを採用することにした。

厳密な位置制御を行うためにサーボ制御系の構築については、モータードライバ+他社製サーボコントローラによる方法を考えていたが、モーターメーカーに相談したところ、ドライバを含んだ専用のサーボコントローラを開発中とのことなので、これを採用するこ

とにした。何度かモーターメーカーとやり取りを行い、サーボコントローラの制御マイコンプログラムを完成させ、制御用 PC からシリアル通信コマンドによって位置決めする制御系を構築することが出来た。(位置決め分解能 0.016mm)

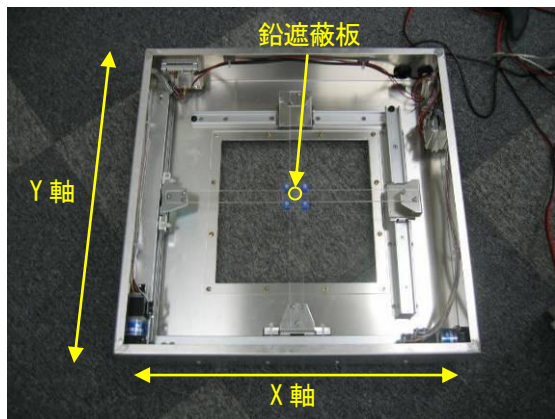
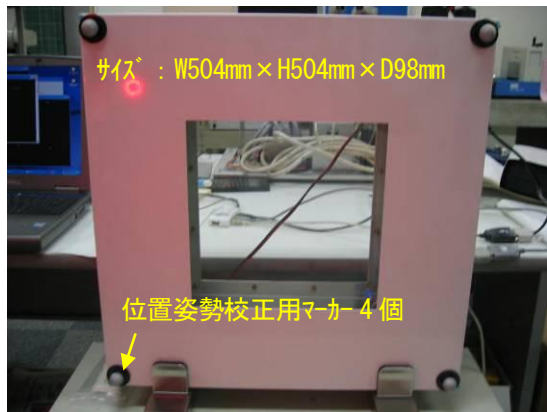


図 4 遮蔽装置本体 (上 : 外観, 下 : 内部)

2.3 高精度な眼球位置計測技術の開発

眼球位置の計測については、非接触に測定できる画像処理による三次元画像計測を採用した。この方法はモーションキャプチャ装置で一般的に採用されているもので、2台のカメラから成るステレオカメラ (図 5) を使用し、カメラ相互の視差情報から三次元位置を計算する方法である。

以前から、この手法を用いて計測をしてきたが、計測誤差が大きく (カメラから 1m 離れた場所で ±10mm 以上の誤差)、正確に眼球位置を計測できない問題があった。

三次元画像計測アルゴリズムについて調べた結果、カメラレンズによる撮影画像の非線形な歪み (レンズディストーション) によって、正確に位置を計算できないことが分かった。使用している C マウントレンズが焦点距離 8mm と比較的広角なレンズということもあり、レンズディストーションの影響が大きい。

レンズディストーションの補正方法について文献を調べたところ、多項式による補正法があることが分かり、その中でも比較的簡単に補正効果の大きな 3 次多項式による補正法 (式 1) を用いることとした。

$$x' = x + dx \quad y' = y + dy$$

$$dx = k r^2 x \quad dy = k r^2 y \quad r^2 = x^2 + y^2 \quad (\text{式 1})$$

(k は補正係数, x, y は画像中心を原点とする座標, x', y' は補正された座標)

図 6 のような校正用のテストチャートをカメラで撮影し、撮影された点群の位置データから最小二乗法により (式 1) 中の補正係数 k を算出した結果、 $k = 3.34 \times 10^{-7}$ が得られた。

(式 1) のレンズディストーション補正を行い、当センターにある三次元測定機を使用して、計測精度の確認実験を行った結果 (表 1)、従来に比べて計測精度が 10 倍向上することを確認した (最大誤差 ±1.0mm 以内)。これにより高精度に眼球位置を計測する技術が確立できた。

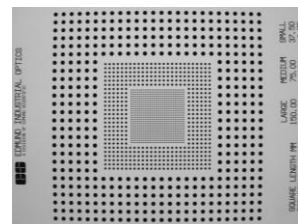


図 5 ステレオカメラ 図 6 テストチャート画像

表 1 三次元画像計測精度の確認結果

	k = 0 (補正無し)	k = 3.34 × 10 ⁻⁷
カメラから 1.2m 位置での誤差 (計測点数 20 点)	-11.42mm ~ +12.56mm	-0.80mm ~ +0.93mm
誤差の絶対値平均	2.51mm	0.23mm

2.4 制御プログラムの開発と動作実験

図 7 に遮蔽体による眼球の遮蔽原理を示す。図 7 のように、遮蔽装置本体の座標系 {B} において、眼球位置と X 線源位置を結ぶ直線と遮蔽体の移動平面である XY 平面との交点が遮蔽体を位置決めすべき位置となる。

前述の直動スライダの位置決め制御系と眼球位置計測技術を統合し、X 線源と眼球の相対的な位置関係が変化しても、常に眼球部を自動遮蔽できる制御プログラムを開発した。(図 8)

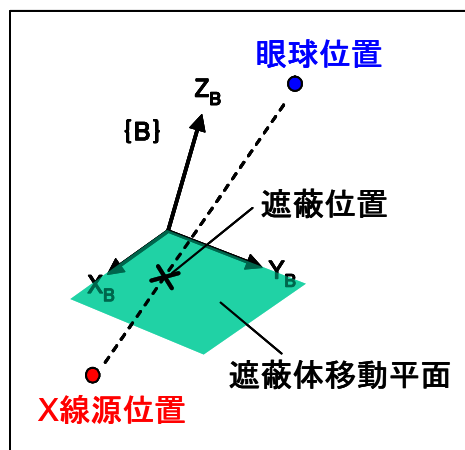


図 7 遮蔽原理

カメラの画像ノイズによる計測位置の微小なブレをローパスフィルタで除去し、また直前の計測位置からの変化量を監視して不正な計測データか否かを判定することで、遮蔽装置の動作安定性を確保している。制御間隔は約 1 秒だが（画像データ取り込み用フレームグラバーのマルチプレクサ切替時間が約 0.4 秒かかるので、カメラ切替だけで $0.4 \text{ 秒} \times 2 = 0.8 \text{ 秒}$ かかる）、血管撮影装置が高速で動き続けることはないので実用上は十分である。

人間の頭部を模擬したマネキンを使用し、マネキン眼球部に計測用反射テープを貼付して動作試験を行った結果、自動遮蔽機能が良好に動作することを確認できた。（図 9）

実際に計測用反射テープを患者に付ける場合は、アイマスクの様な形態が考えられる。

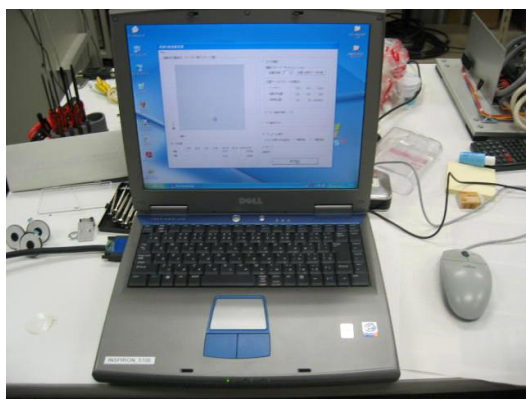


図 8 制御プログラム画面



図 9 模擬体による動作実験

3. 結果

血管撮影装置に後付けできる、軽量で安価な遮蔽装置本体と制御装置の試作機を開発した。また、遮蔽対象（眼球部）を確実に自動遮蔽するために、画像処理による三次元画像計測精度の向上と遮蔽体の位置決め動作制御を最適化して追従安定性の向上を実現した。

血管撮影装置に搭載しての性能テストは、開発協力者である（独）放射線医学研究所での調整が難しく実施できなかったが、試作機を展示会（イノベーションジャパン 2008 大学見本市 H20.9 月開催）に出展し、開発中の医療用 X 線遮蔽装置について広報することができた。（図 10）



図 10 イノベーションジャパン 2008 に出展

<実績>

- ・ 軽量（質量 4kg）かつ安価（2 軸直動アクチュエータ + ドライバで 10 万円程度）な遮蔽装置本体を開発した。
- ・ 画像計測アルゴリズムを改良し眼球位置の計測精度を向上させた。（計測用ステレオカメラから 1.2m の位置で、x, y, z 座標とも最大誤差 $\pm 1.0 \text{ mm}$ 以内）
- ・ カメラの画像ノイズによる計測位置の微小なブレを除去、また不正な計測位置を判定し、遮蔽装置の動作安定性を向上させた。

<今後の予定>

開発の途中、カテーテル手術を行っている病院において血管撮影装置の調査を行い、担当する放射線技師の意見を聞いたところ、実用化に向けて次のような技術課題を解決する必要があることが分かった。

- ① ステレオカメラを使用しない X 線透視画像による、遮蔽体位置制御の実現（血管撮影装置の機構上、どこにカメラを配置してもカメラの死角が発生する場合があります、確実な眼球の位置計測ができない）
- ② 遮蔽装置本体の更なる小型化（血管撮影装置の X 線管は以前よりも非常にコンパクトになっており、試作機のサイズではまだ大きすぎる）

上記の課題を踏まえ、実用化に向けて更なる開発を続ける予定である。