

## Apollonius 球による画像原点の推定

加藤 晃市 酒井 洋 奥平 雅士

NTT ヒューマンインタフェース研究所  
〒180 東京都武蔵野市緑町3-9-11

### あらまし

ビデオカメラから入力した画像より3次元計測を行なう場合、画像原点は計測精度を決定する重要なパラメータである。本研究では、平面上に分布する密な特徴点情報を用いれば、カメラ投影中心位置は Apollonius 球上の点として推定されることを示し、これを利用して画像原点を求める方法について述べる。

キーワード：画像原点, Apollonius 円, カメラキャリブレーション, 液晶ディスプレイ, コンピュータビジョン

## The Method for Calibration of Image Center using Apollonius Sphere

Koichi KATO Hiroshi SAKAI Masashi OKUDAIRA

NTT Human Interface Laboratories  
Midori-Cho 3-9-11, Musashino-shi, Tokyo 180.

### abstract

A novel method for calibration of image center is proposed, employing a direct, geometrical approach called the projection of elliptic cone(PEC) method to be also proposed here. We suggested that the locus of perspective projection center traces a apollonius sphere by using PEC method and a image center is estimated using the sphere.

Key words : Image Center, Apollonius Circle, Camera Calibration, Liquid Crystal Display, Computer Vision

## 1 はじめに

コンピュータビジョンにおいて、画像から三次元計測を行う場合、そのカメラパラメータの把握（カメラキャリブレーション）は必要不可欠な課題であり、古くから多くの研究がなされている [1]。特にロボット制御や環境情報取得等への適用を考えた場合、推定される物体の三次元位置は結像システムの精度に依存するため、より高精度なカメラパラメータの導出が重要となる。

一般にカメラパラメータとは、「外部パラメータ」と「内部パラメータ」に分けることができる。外部パラメータはワールド座標系に対するカメラの位置および姿勢を決定するパラメータであり、カメラの位置を与える3次元の座標値と姿勢を与える3軸回りの回転角度によって表現される。一方、内部パラメータはカメラの光学特性であり、焦点距離および画像原点、画像の歪係数等で表される。中でも「焦点距離」および「画像原点」は、2次元データから3次元解釈をするうえでの基本ファクターである。しかし、実際のカメラ系では直線が曲線に変換される収差歪みや画像の縦横比が異なるアスペクト比の歪みを有するため、単純な透視投影変換とはみなせない場合が多い。

これまでに提案されているカメラキャリブレーション手法は一般的に、空間中に配置された既知の試験対象を撮影し、予め設定したカメラモデルに従ってカメラパラメータを間接的に推定するものであった。しかしその場合、初期値の与え方、特徴点の設定が解に影響し、信頼性を左右する問題が発生する。また、各パラメータ間の誤差の振舞いも明確ではなく評価関数の設定も注意を要する。

本論文では、これらの問題を解決するため画像の3次元解釈において基礎となる画像原点を独立に求める方法を提案する。提案手法では、試験対象として、液晶ディスプレイのような高精度でフラットな表示装置を利用し、ディスプレイ上に描画した図形をキャリブレーションのための特徴点とする。カメラ側から見て任意位置に特徴点を設定できることを利用すれば、他のカメラパラメータとは独立に画像原点推定が可能であることを示す。

## 2 画像原点の定義

コンピュータビジョンにおいて求めるべき画像原点は、その用途目的に応じて様々な定義が存在する [2]。但し、画像種別で分類すると以下の三種類となる。まず第一は、センサデバイスの中心や画像座標中心等の画像特性とは無関係に定まる座標である。これらは、「画像計測」という観点からすれば精度に影響を与えるものではないため重要性は低い。第二に単眼視画像より定まる定義である。これは、画像から3次元解釈を行なう上で基本となるもので、カメラ系の透視投影変換より定まる射影幾何学的な中心、レンズ光軸より決定される光学的中心、レンズの収差歪みに起因した歪中心等が含まれる。第三は、複数枚の画像より定義される画像原点である。カメラを移動ロボット等の何らかの運動系に搭載した場合、あるいはズーム、フォーカス等のレンズ系が運動をする場合において、各画像間で投影像の位置が変化しない座標が存在する。これを画像原点の「運動学的定義」とする場合もある [3]。

以上のように、画像原点の定義は多く存在し各々が独立した定義であるため一致する保証はない。また、その重要性は目的に依存する。本研究では「画像の3次元解釈」という立場から、最も基本となる透視投影変換モデルより決定する画像原点を求めるものとする。

### 2.1 カメラモデル

一般にテレビカメラ等の中心投影方式のセンサは図1に示すように画像全体にわたり1点の投影中心  $O_p$  を持つ。ここで、投影中心から画像投影面に下ろした垂線の足を主点 (Principal point) と呼び画像座標系  $(U, V)$  における「画像原点」とする。また、画像原点  $O_s$  と  $O_p$  を結び空間中に伸びる直線を光軸と呼びその間の距離を焦点距離と呼んでいる。図1中の  $(X, Y, Z)$  はカメラの置かれた3次元空間のワールド座標系であり、カメラの位置・姿勢は、 $O_p$  の空間中での位置座標と光軸方向の回転ベクトルによって決定される。これらを一般的にカメラの外部パラメータと呼び、焦点距離および画像中心、画像のひずみ係数等を内部パラメータと呼んでいる。

画像の歪みは大別して、光学系歪みと撮像系ハードウェアに起因する歪みとに分けられる。まず、光学系歪みは主として放射方向歪曲収差、接線方

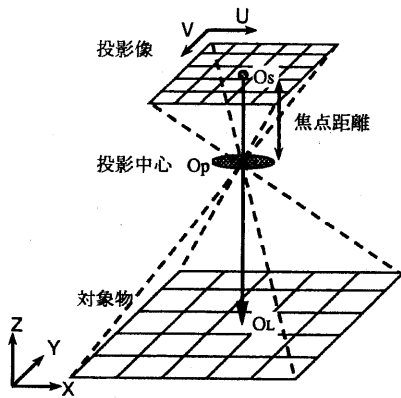


図 1: 中心投影方式センサ

向歪曲収差、射影歪み等がある [4]。この内、放射方向歪曲収差は図 2 に示す様にレンズ中心  $O$  に入射角  $\theta$  で入射した光が、本来到達すべき点  $a$  ではなく  $a'$  に到達する現象により現われ、光軸周りに対称な歪みとなる。接線方向歪曲収差はレンズエレメントの光軸不一致に起因し、射影歪みは光軸と投影面の非直交に起因する。このどちらも回転対称とはならないが、一般的に放射方向の歪みより十分小さいと考えられ、ここでは放射方向歪みのみを光学歪みとする。以下これをレンズ収差と呼ぶ (図 3.a)。

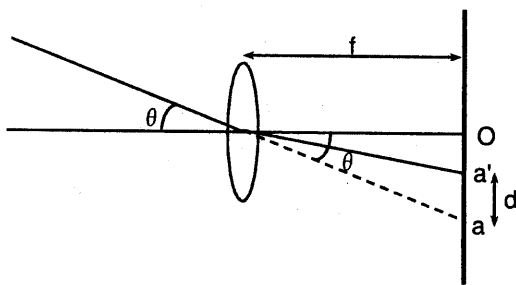


図 2: 収差歪みの影響

また、撮像系ハードウェアに関して現在主力である CCD カメラによる画像入力システムでは、画像の縦横比 (アスペクト比) が異なる歪みがある。以下これをアスペクト差異とよぶ (図 3.b)。

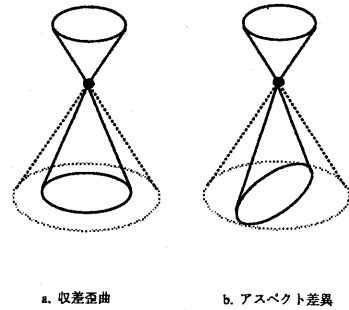


図 3: 歪みの影響

### 3 従来手法

カメラキャリブレーションを行う場合、内部パラメータおよび外部パラメータを数値モデルとして記述し実画像 (テストボタン) とのズレを補正分として加える。前述のひずみモデルも考慮し、カメラキャリブレーションを行うには、より高次の非線形方程式となる。この非線形方程式は陽に解を得ることはできないため、反復最適化法などを利用して解を探索する [5] [6] [7]。しかし、一度に全てのパラメータを求める方法には危険をとまらうことが指摘されている [3]。

まず、反復最適化法等を用いるため、カメラキャリブレーションをする上で、本質的問題ではない初期値の与え方、あるいは誤差最小化における指針が解に影響する問題がある [1]。さらに、精度を得ようとする場合、試験対象となるテストボタンの設定には熟練を要するのが一般的であり、専門家の経験なしでは高精度が期待できない。また、ピンホールモデルを前提としたカメラモデルでは、例えば「魚眼レンズ」の様に広角視野を持つ光学系には適用困難である。

カメラ内部パラメータを独立に求める手法としては、カメラに正対しない複数の平面上に存在する平行線の組より、その消失点方向を計測しカメラ視点位置を計算する方法が一般的である [8] [9]。しかしその場合、画像全体にわたって歪みは無視できる、あるいは十分補正されているという条件が必要である。また、設定した平面の傾きは、予め高精度に計測しておく必要があり、測定にはある程度の経験を要する。

これとは別にカメラに向かってレーザー光を照射しその反射を観測して画像原点を求める「auto-

collimated laser」という方法[10]もあるが、装置そのものが大がかりになるだけでなく、センサデバイスそのものにダメージを与える危険性がある。

#### 4 Apollonius 球による画像原点の推定

筆者らは、カメラキャリブレーションを行なう際に、試験対象として液晶ディスプレイを用い、ディスプレイ上に描画された図形を特徴点として利用する方法について検討を進めてきた。試験対象をディスプレイとする場合、以下のような利点が挙げられる。

- 高精度な試験対象を用意する必要がない
- 正確な回転等の特殊操作を要しない
- 図形の明減等を利用して図形の自動抽出可能
- カメラ側の観測情報を図形描画にフィードバック可能

また、CCD 上の受光素子各々がカメラ外部の何処へ投影されるかといったデータが取得できるので、カメラ外部よりカメラ投影中心を直接求めるといった計算が可能となる。これらの特徴を利用した、カメラキャリブレーション手法として、以下の計測法を提案する。

##### 4.1 楕円錐投影を用いた投影中心導出法

まず、空間中において、投影中心を頂点とし光軸を中心軸とする円錐を考える。

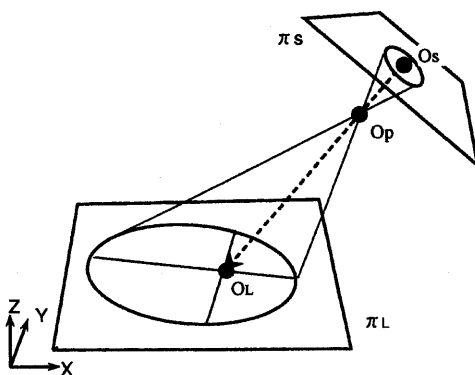


図 4: 楕円錐投影

図4中  $\pi_s$  は撮像面であり、 $\pi_L$  はディスプレイユニットの表示部である。 $\pi_s$  および  $\pi_L$  は  $O_p$  を

頂点とする円錐の切断面となり、その軌跡は円および楕円となる。理想的なピンホールモデルのカメラであれば、撮像面側およびディスプレイユニット側での円錐は同一の頂角となるが、実際には歪みの影響を受けるため必ずしも一致しない。よって本提案では、歪みの主要因であるレンズ収差およびアスペクト差異を考慮するものとする。前節で述べたように、レンズ収差は画像原点に対して半径方向に比例するものである。この歪みは、円錐の頂角の差異となる(図3.a)。また、アスペクト差異の影響は  $\pi_L$  の  $U$  軸方向の伸縮として現われる。よって、撮像面側の円錐は、ディスプレイユニット側では楕円錐に変形する(図3.b)。以上の特性を踏まえて考えると「円錐の中心軸は光軸である」ことのみが幾何学的な不変特徴である。これは、光軸を含む任意の平面によって切断される円錐断面で、光軸は  $O_p$  を頂点とする角の二等分線となることを意味する。

ここで、何らかの方法により画像原点が定まった場合を考える。撮像面上で画像原点を二等分点とする線分の端点を求め、各々に対応するディスプレイユニット上の点を  $P_1$  および  $P_2$  とする。 $O_p, P_1, P_2$  を結ぶ三角形を考えると図5となる。ここで、 $\pi_L$  は、ディスプレイユニット面、 $\pi_p$  は光軸を含む任意の平面、 $O_L$  は光軸とディスプレイユニット面の交点である。上記の幾何学特性より、光軸は  $O_p$  の角の二等分線となる。ただし、 $O_L, P_1, P_2$  は実測可能なパラメータであり、 $O_p$  の位置および  $\pi_p$  の傾きは未知である。

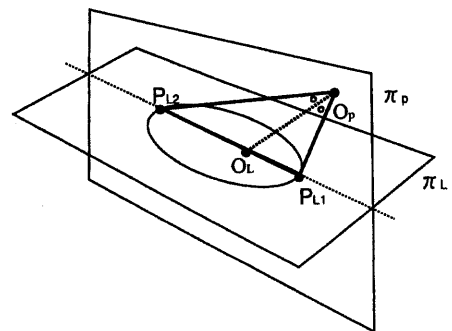


図 5: 円錐断面

図6に示す三角形において角の二等分線の性質を考えると、 $AC : BC = AO : BO$  という関係が成立するため、 $C$  は  $(\frac{a_0 a_2}{a_0 + a_2}, 0)$  を中心とし、半

径  $\frac{x_a x_b}{x_a + x_b}$  の Apollonius 円となる。これを、三次元空間に適用すると、図 7 に示すように  $O_p$  の位置は  $P_1, P_2$  の延長上に中心をもつ球上に拘束できる。この球を Apollonius 球と呼ぶこととする。

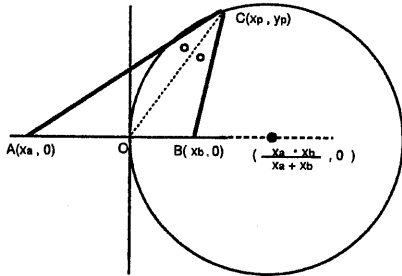


図 6: 頂角二等分条件による  $O_p$  軌跡

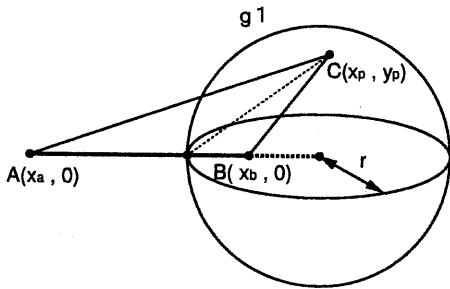


図 7: Apollonius 球

この Apollonius 球は、 $O_L$  を通る 2 線分について求めると各々独立に決まり、図 8 に示す二つの球  $g_1, g_2$  が設定できる。よって、 $O_p$  の存在範囲は  $g_1, g_2$  の交線上  $C_p$  となる。また光軸の存在領域も、 $C_p$  を含み  $\pi_L$  に垂直な面を  $\pi_p$  に限定できる。

$g_1, g_2$  の中心を  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  とすると  $C_p$  の中心  $(x_3, y_3)$  は以下となる。

$$x_3 = \frac{(y_2 - y_1)(x_1 y_2 - x_2 y_1)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

$$y_3 = \frac{(x_1 - x_2)(x_1 y_2 - x_2 y_1)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

図 9 は、Apollonius 球を設定した二線分  $l_1, l_2$  の交角  $\theta_L$  と、その見かけの角度  $\theta_s$  の関係を示したものである。

ここで、計算の簡略化のために見かけの角度  $\theta_s$  が  $90^\circ$  である場合を考える。 $\pi_p$  と  $\pi_L$  の交線を  $l_p$

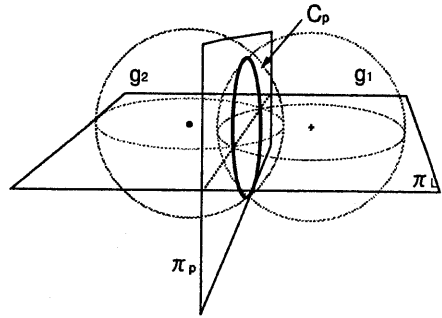


図 8: Apollonius 球の交線

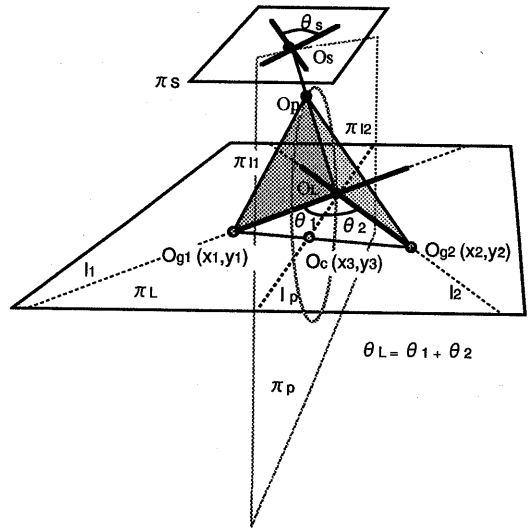


図 9: 線分交角と見かけの角度の関係

とし  $l_1, l_p$  のなす角を  $\theta_1$ 、 $l_2, l_p$  のなす角を  $\theta_2$  とすれば、

$$\tan \theta_1 = \frac{x_1 y_3 - x_3 y_1}{x_1 x_3 + y_1 y_3} \quad (3)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{x_2 y_3 - x_3 y_2}{x_2 x_3 + y_2 y_3} \quad (4)$$

である。 $\pi_p$  上において  $l_p$  と光軸  $l_o$  のなす角  $\theta_p$  は

$$\theta_p = \sin^{-1}(\sqrt{\tan \theta_1 \tan \theta_2}) \quad (5)$$

として、一意に決まる。よって  $O_p$  の位置は

$$x_p = 2x_3 \cos^2 \theta_p \quad (6)$$

$$y_p = 2y_3 \cos^2 \theta_p \quad (7)$$

$$z_p = 2 \cos \theta_p \sin \theta_p \sqrt{x_3^2 + y_3^2} \quad (8)$$

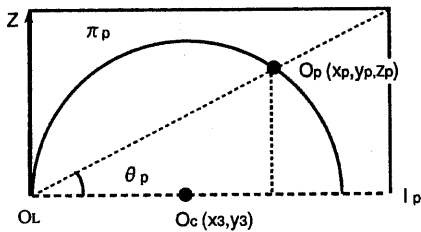


図 10: 投影中心位置の導出

で、与えられる座標となる。但し、本手法はディスプレイユニットがカメラ撮像面と並行しないことが前提となる。図 11は、カメラに対する液晶ディスプレイ（試験対象）の傾きと投影中心位置の推定精度を求めたシミュレーション結果である。この結果より、試験対象はカメラに対して、 $20^\circ \sim 70^\circ$ の傾きであれば精度に影響しないと推測できる。また、図 12は、投影円錐の頂角の大きさと投影中心位置の推定精度の関係を求めた結果である。この関係より円錐の頂角は、 $60^\circ$ 以下で十分な精度を得られることが分かる。

#### 4.2 画像原点の推定

画像原点の設定に誤差がある状態で前述の手法を適用する場合を考える。画像原点の定義は、カメラ投影中心より撮像面に垂線をおろした時の足の座標である。画像原点の誤差は、カメラ投影中心と設定座標を結ぶ軸の傾きとなり、撮像面側の円錐は楕円錐になり設定軸も楕円錐中心より外れる。これは、軸による頂角の二等分条件を満たさず、任意の二線分より設定される Apollonius 球の交線は安定しないことを示す。そこで、画像領域各点について、複数の 2 線分組合わせて、Apollonius 球を求め、導かれるカメラ投影中心位置の分散を調べることにした。

図 13は、コンピュータで作成した透視投影変換モデルに対して、本手法を適用し、投影中心位置の分散を求めたシミュレーション結果である。

この結果より、投影中心位置の分散値は画像原点において最も小さく、画像原点より遠ざかるにつれ大きくなることが分かる。よって本手法を用いて、投影中心位置の分散値が最も小さくなる点を探索すれば実際のカメラ系の画像原点も探索可能であると推測できる。

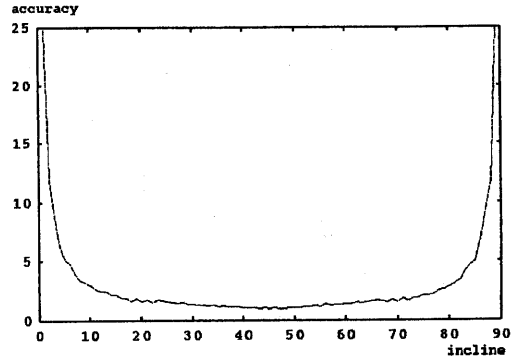


図 11: 試験対象の傾きに対する推定精度

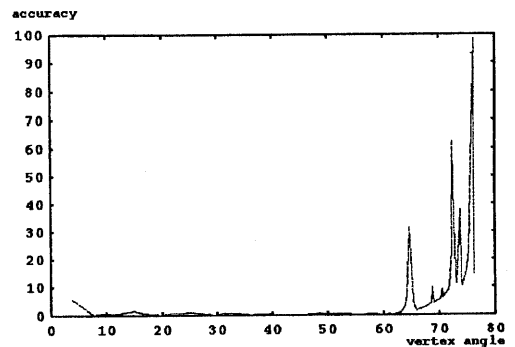


図 12: 頂角の大きさに対する推定精度

## 5 実験

本提案手法の検証を行うため、実験システムを構築した(図 14)。実験に測定対象として使用したレンズは、焦点距離  $8\text{mm}$ 、画角  $180^\circ$  の全周魚眼レンズである。試験対象とした液晶ディスプレイは、画素ピッチ  $0.45\text{mm} \times 0.45\text{mm}$  で解像度  $640 \times 480$  のものを使用した。

画像原点を含むと思われる画角  $60^\circ$  程度の範囲をカバーするように液晶ディスプレイを設置し計測を行なう。カメラ撮像面と液晶ディスプレイの対応点検索は、描画図形のコントラストを出すために直線描画により求めた。液晶面上  $x$  軸方向および  $y$  軸方向に直線を移動させながら描画し、注目画素を横切る直線群を求め、その交点座標どうしを対応点として記録する。今回の実験ではディスプレイの傾きを変化させて 10 回の測定を行な

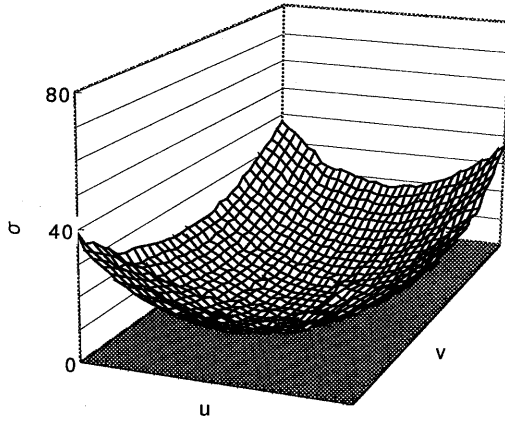


図 13: 投影中心位置の分散

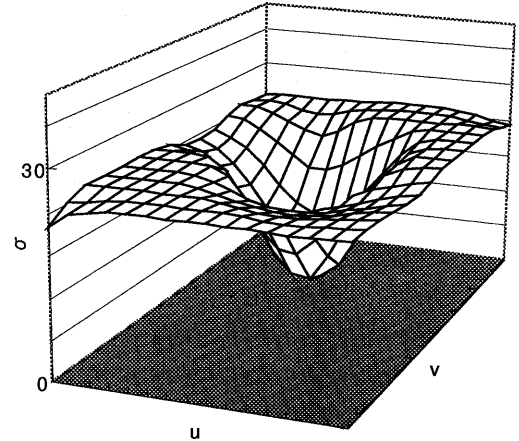


図 15: 実験結果

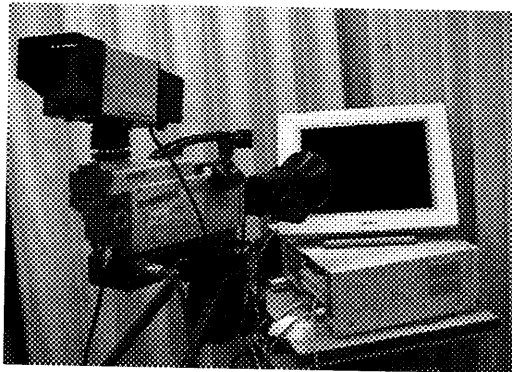


図 14: 実験システム

い、分散値の平均を求めた。図 15 にその実験結果を示す。画像の中心部付近  $50 \times 50$  の領域について、計測される投影中心の分散はある座標をピークとする凹状の分布であることを確認した。この最も低い分散値を示す座標が画像原点であると推測できる。

## 6 まとめ

本論文では、カメラ投影中心位置を Apollonius 球上の点としてカメラ投影中心を計測できることを示し、その計測結果の振舞いより画像原点を推定する手法を提案した。本手法では、試験対象として液晶ディスプレイを用いるため高精度かつ特殊な操作を要することなくカメラの画像原点を求

めることが可能である。今回は、検証実験のため焦点距離の非常に短いレンズ系の測定を行なった。しかし本手法は、何らかの光学特性に依存するものではない。また、画像原点が定めれば液晶ディスプレイに対するカメラ投影中心も定まるため、焦点距離、歪係数といった他のカメラパラメータ計測も容易となり、キャリブレーションの前処理としても有効である。

シミュレーションにて、分散値最小の座標が画像原点であることを確認したが、実際のカメラ系において、いかにして厳密な検証を行なうかは今後の課題である。また、液晶ディスプレイ上での描画で得られるデータは離散的であり、これが計測精度に及ぼす影響についても十分検討する必要がある。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、有益なコメントを頂いた NTT ヒューマンインタフェース研究所の仲西正主任研究員および荒川賢一主任研究員に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 出口光一郎: カメラキャリブレーション手法の最近の動向, 情報処理学会コンピュータビジョン研究会報告, pp.1-8, No.82-1, 1993.

- [2] R.G.Willson and S.A.Shafer: What is the center of image?, Technical Report CMU-CS-93-122, Carnegie Mellon University, 1993.
- [3] 金谷 健一, 浦沢 康二: 画像原点推定のためのカメラキャリブレーション, 情報処理学会研究会報告, CV81-4, PP25-32,1993.
- [4] 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, pp.265-268, 1990.
- [5] S. W. Shih and Y. P. Hung and W. S. Lin: An efficient and accurate camera calibration technique for 3D computer vision, Proc. of IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp.755-759, 1992.
- [6] J. Weng and P. Cohen and M. Herniou: Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol 14, No.10, pp.965-980, 1992.
- [7] R. Y. Tsai: A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, RA-3, No.4, pp.323-344, 1987.
- [8] B. Caprile and V. Torre: Using vanishing points for camera calibration, International Journal of Computer Vision, 4, pp.127-140, 1990.
- [9] K. Daniilidis and J. Ernst: Active Intrinsic calibration using vanishing point, Pattern Recognition Letter, 17, pp.1179-1189. 1996.
- [10] S. Shah, and J. K. Aggarwal: Intrinsic parameter calibration procedure for a (high-distortion) FISH-EYE LENS camera with distortion model and accuracy estimation, Pattern Recognition, Vol.29, No.11, pp.1775-1788, 1996.