

撮像素子の能動制御による効率的な三次元画像計測

野田隆史 日浦慎作 井口征士
大阪大学大学院 基礎工学部研究科

要約：アクティブビジョンは効率的かつ高精度に対象の情報を得るための手法であり、カメラの位置や撮影方位を最適に制御するさまざまな方式が提案されているが、依然として撮像素子は常に一定の速度・解像度の画像を送り続ける装置として扱われ、最適化されているとはいえない。そこで本論文では撮像素子から画像を読み出す領域を能動的に制御することにより、計測精度を保ったまま計測速度を向上させる方法について提案する。

Efficient 3-D Measurement using Active Control of Imaging Device

Takashi NODA, Shinsaku HIURA and Seiji INOKUCHI
Graduate School of Engineering Science, Osaka University

Abstract: Active vision is a method to acquire information of the scene accurately and efficiently, and several optimization method have been proposed for controlling the position and direction of the camera. However, the imaging device have been left passive and not optimized yet, and is considered that it captures and transfers the image constantly. In this paper, we propose an active control method for the imaging device to measure the fast motion of the object without accuracy degradation.

1. はじめに

我々は外界の変化に応じた行動を行うために、環境を知覚し認識している。なかでも視覚は最も情報量の大きい感覚器官であり、視覚を通して、物体の位置決定や同定を行い、物体間の関係を知ることができる。このような機能を機械においても実現できれば、知的なロボットとして人間に代わって有用な仕事を遂行できるはずである。このように、視覚は機械を知的にするための重要な機能であり、従来から多くの研究が行われてきた。

このような研究において、ロボットの視覚センサとしては、NTSC 規格に沿った CCD カメラが主に使用されてきた。これは、このカメラが広く普及し、低コストかつ小型なものを利用できるためである。また、一般性が高いため、多くの画像処理ハードウェアがサポートしているといった理由もある。しかし、視覚センサによってロボットの動きを制御するビジュアルフィー

ドバックなどの研究においては、視覚センサに 1 k frames/sec という高速なフレームレートを要求しているが^[1]、NTSC 規格のカメラは 30 frames/sec の速度であり、このことが大きな問題とされてきた。

ロボットの視覚センサにおいて高速性を実現しようとした場合、画像の読み込み時間を短縮する以外にもその画像情報の処理を高速に行うことが必要である。そのためには効率的に情報を獲得することが必要であり、そこで、アクティブビジョンという考え方が提案されている^[2]。これは必要な情報を能動的に獲得しようという考え方であり、カメラの位置、撮影方位、焦点などを最適に制御する方法が提案されてきた^[3]。しかし、カメラの撮像素子の駆動方法に着目し、アクティブビジョンを適用しようとする研究はほとんど報告されていない。

本研究では、撮像素子を能動的に制御し、必要な部分の画像の信号のみを読み出すことによ

り効率的な計測を行う手法を述べている。また、その有効性を示すため、既知の立方体の運動を追跡しその計測速度、計測精度の評価を行った。

2. 撮像素子の能動制御

本研究では、撮像素子の能動制御を行うために、CCD の部分読み出し機能を用いた。部分読み出しとは、任意の指定した領域のみの信号を読み出し、それ以外の信号を高速で掃き捨てることにより、フレームレートを向上させることができる機能である(図 1)。この機能を使用することによって計測システムを速度を向上させることが可能となる。

本研究では「EDC-2000N」というカメラを使用する。このカメラは、転送方式はフレーム転送型・全画素読み出し方式であり、NTSC 信号を使用していない。表 1 にその主な仕様を示す。

表 1 EDC-2000N の仕様

CCDの大きさ	4.84 × 3.67mm
素子数	652(H) × 494(V)
画素サイズ	7.4 × 7.4 μ
蓄積容量	30,000electrons
RMS読み出しノイズ	20 electrons
最大量子効率	75% @ 0.65 μ
非均一性	15% maximum
露光時間	1msec ~ 5sec

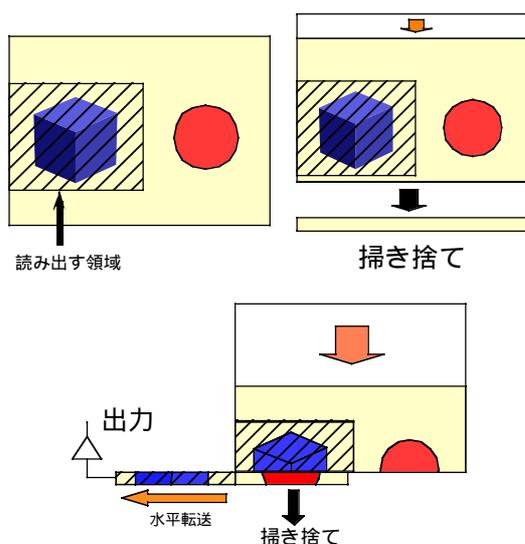


図 1 部分読み出しの仕組み

3. 平面部を有する物体の追跡

3.1 動作の概要

本システムでは、形状モデルを事前に獲得している物体の追跡を行う。

物体の3次元位置を測定する方法は多数提案されている。本システムでは、その代表的な手法のひとつである、スポット光投影によるアクティブステレオ法を採用する。

アクティブステレオ法とは、一方から発した光が対象に反射して帰ってくる方位を計測し、光の投影方位と組み合わせることにより三角測量を行う手法である^[4]。本システムでは、液晶プロジェクタからスポット光を投影し、それを CCD カメラで計測する。

まず、グレイコードパターン光投影法によるキャリブレーションを行い、空間に座標系を設定する。これにより、物体の移動を定量的に表現することが可能となる。また、キャリブレーションによって得られたカメラパラメータやプロジェクタパラメータを用いれば、任意の座標にスポット光を投影し、その3次元座標を計測することが容易となる。

次に、物体の平面にスポット光を投影し、エピポーラ線と呼ばれる直線上から、スポット光のカメラへの反射光を検出し、スポット光の3次元座標を求める。物体のモデルをあらかじめ持っているので、投影するスポット光は互いに平行でない平面に3点ずつでよい。

そして、得られた3次元座標の位置から3平面のパラメータを算出し、物体の運動パラメータを求める。運動パラメータとは物体の位置姿勢を表す、並進及び回転の6パラメータのことである。

画像の読み込みから物体の位置姿勢検出を繰り返すことにより動物体の運動軌跡を求める。

3.2 グレイコードパターン光投影法によるキャリブレーション

キャリブレーションとはピンホールカメラに基づいた透視変換モデルに同時座標系を導入す

ることによって、物体座標系からカメラ座標系あるいは物体座標系からプロジェクタ座標系への変換行列を求めることをいう。この変換行列をそれぞれカメラパラメータ、プロジェクタパラメータといい、式(1)、式(2)のように記述できる。

$$\begin{bmatrix} H_c X_c \\ H_c Y_c \\ H_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} H_P X_P \\ H_P Y_P \\ H_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1辺 16 cmの基準立方体(図 2)の各辺に沿って世界座標系を設置し、グレイコードパターンを投影して、カメラパラメータとプロジェクタパラメータを得る^[4]。水平、垂直の 2 軸方向にグレイコードパターンを 20 枚ずつ投影し $2^{10} \times 2^{10}$ に空間を分割した。

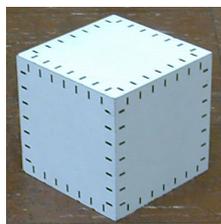


図 2 基準立方体

3.3 エピポーラ拘束によるスポット光の探索範囲の縮小

スポット光投影によるアクティブステレオ法において、プロジェクタから物体に投影されたスポット光の反射光のカメラ座標系での座標を決定するとき、カメラ座標系全体で探索したのでは効率が悪い。ここでは、エピポーラ拘束条件を用いることにより、スポット光の探索範囲を大幅に小さくする方法を述べる。

図 3においてカメラの投影中心 C_1 、プロジェクタの投影中心 C_2 、物体上の点 P を含む平面は

エピポーラ平面と呼ばれる。このエピポーラ平面とカメラの画像平面との交線をエピポーラ線 (L_1) といい、物体上の点 P のカメラにおける対応点 M_1 はこの直線上にある。

そのため、カメラ画像平面におけるスポット光の探索はこのエピポーラ線上のみで行えばよいことになり、スポット光探索の時間を大幅に短縮することができる。

また、図 4のようにカメラの光軸と基線(カメラの投影中心とプロジェクタの投影中心を結ぶ線)を垂直にし、カメラの画像平面上の一方の軸と基線を平行にすると、任意のエピポーラ線がカメラの画像平面上のその軸に対してすべて平行になる。

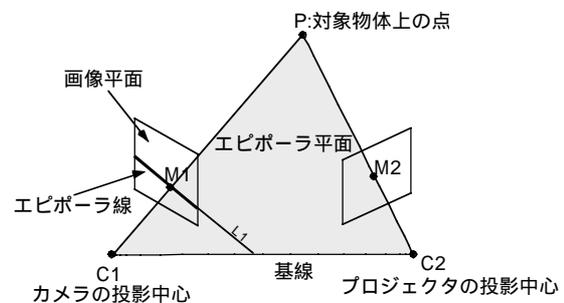


図 3 エピポーラ幾何

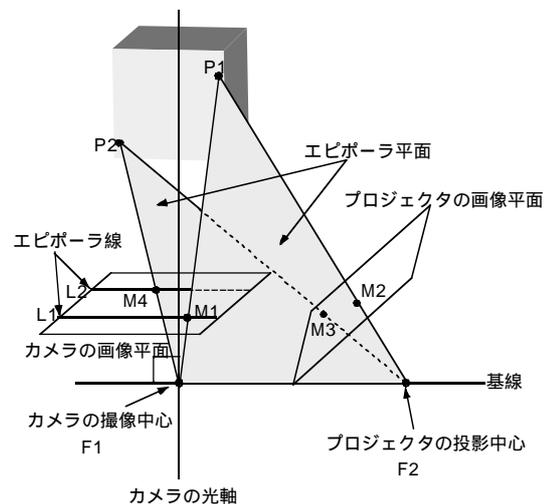


図 4 プロジェクタとカメラの拘束条件

3.4 スポット光の投影

投影するスポット光はOpenGLによって作成し、プロジェクタから投影する。このとき、任意のスポット光に対するエピポーラ線が重ならない

ようにスポット光を配置する．これにより，スポット光とエピポーラ線が1対1対応し，スポット光の探索が容易となる．また，誤差を小さくするため，同一平面上に投影した3点が形成する三角形は面積が大きくなるようにスポット光を投影する．

3.5 画像の読み出しとスポット光の検出

今回使用するカメラ「EDC2000N」は任意の複数行の部分読み出しが可能であるが，画面上を斜め方向にたどりながら読み出すことはできない．しかし，図4のようにカメラとプロジェクタを配置すると任意のエピポーラ線がカメラの画像平面のある軸に対してすべて平行になる．よってエピポーラ線と部分読み出しの領域を一致させることが可能である．しかし，実際にはこのような条件に完全に一致するようにカメラとプロジェクタを設置することは困難であり，また，キャリブレーションの誤差もあるため，すべてのエピポーラ線がカメラの1つの軸に対して平行であるようにするのは難しい．よって図5に示すようにカメラの部分読み出しの領域はエピポーラ線を斜辺とする直角三角形とした．これにより，全画素を読み出した時と比較すると，大幅に読み出し時間を短縮する事ができ，動物体の追跡をより高速に行うことができる．

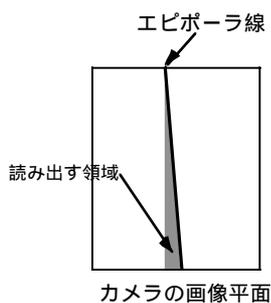


図5 画像を読み出す範囲

スポット光の探索はエピポーラ線上の画像のみで行えばよい．そこでスポット光投影前のエピポーラ線上の画像を取得しておき，投影後の画像との差分を取り，それが最大となる位置から，スポット光のカメラ座標系における座標を決定する．

3.6 運動パラメータの算出

プロジェクタから投影するスポット光の座標 (X_p, Y_p) と，カメラにおけるスポット光の投影像の座標 (X_c, Y_c) が得られると，式(1)，(2)を連立させることによりスポット光の投影点の3次元座標が求められる．

世界座標系において，ある平面の3点の座標を獲得できれば，そこから平面の方程式を求めることができる．世界座標系とは別に初期位置での物体の重心を原点として，座標系を設定すると，平面の法線ベクトルの変化から回転行列を求めることができる．得られた回転行列Rからロール角 (ϕ) ，ピッチ角 (θ) ，ヨー角 (ψ) を式(3)により算出した．ロール，ピッチ，ヨー角はそれぞれZ，Y，X軸を中心とする回転角であり，この順番で回転を行ったものとする．

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} C_\phi C_\theta & C_\phi S_\theta S_\psi - S_\phi C_\psi & C_\phi S_\theta C_\psi + S_\phi S_\psi \\ S_\phi C_\theta & S_\phi S_\theta S_\psi + C_\phi C_\psi & S_\phi S_\theta C_\psi - C_\phi S_\psi \\ -S_\theta & C_\theta S_\psi & C_\theta C_\psi \end{bmatrix}$$

$$\phi = \text{atan} 2(\pm R_{21}, \pm R_{11})$$

$$\theta = \text{atan} 2\left(-R_{31}, \pm \sqrt{R_{11}^2 + R_{21}^2}\right) \quad (3)$$

$$\psi = \text{atan} 2(\pm R_{32}, \pm R_{33})$$

また，モデルが得られているので，3平面の交点から現時点での重心の座標を算出し，並進ベクトルを求めることができる．

4. システム構成

本実験のシステム構成を図6に示す．プロジェクタとカメラの配置については，キャリブレーションやスポット光投影の時にプロジェクタの画面を向いている立方体の3面について同じような角度で光が照射できるようにし，また，プロジェクタとカメラの画像平面上に写る立方体の面が共に同じ3面であるようにするため，プロジェクタを上カメラ下に配置した．また，

カメラの前後位置と角度を微調整可能な機構を用いて図 4で示した拘束条件に従うように、プロジェクタとカメラを配置している。このとき、カメラから物体までの距離は約 1.5m となっている。また、プロジェクタ及びカメラは PC(CPU:Pentium 1GHz)により制御する。スライドステージは、SiliconGraphics 社 Indy により RS-232C を介して制御することにより物体の回転及び平行移動を行うことができる。実際に実装したものを図 7に示す。

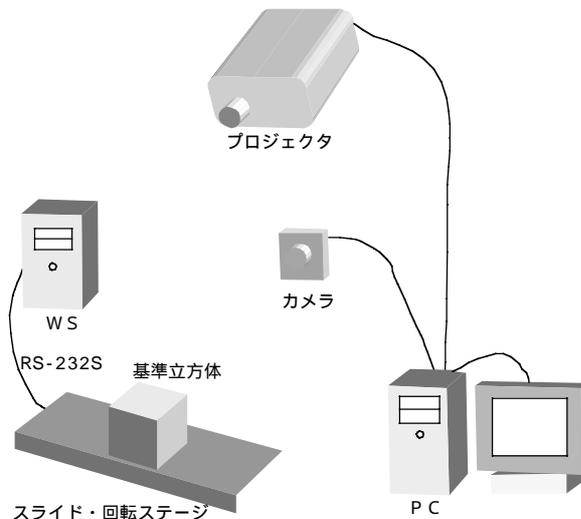


図 6 システム構成図



図 7 システム構成実装図

5. 計測速度の検証

5.1 実験方法

図 4に示すように、カメラとプロジェクタの配置を行い、各スポット光に対するエピポラ線がカメラの一方の軸とほとんど平行になるよ

うにし、カメラの部分読み出しの行数がエピポラ線の数にほぼ一致するようにする。そしてスポット光を投影・画像の入力・座標の計算・立方体の運動パラメータの算出の一連の処理を行うフレームレート及び、各段階での処理時間を計測した。

また、部分読み出し機能を使用せず、カメラの全画素から信号を読み出した場合の読み出し時間を計測し、部分読み出しを行った場合と比較を行った。

5.2 結果及び考察

本研究では、NTSC 規格に沿ったカメラよりも高速な計測を目標としている。即ち、画像の入力時間を 33[msec]より短くすることである。実験の結果、表 2に示すように画像の入力時間を NTSC 規格に沿ったカメラの 1/3 以下にすることができた。また表 3に示すように部分読み出しは全画素読み出しより画像入力時間を約 1/20 に減少させることができた。これらにより、本手法の効率性、高速性が示せた。

しかし、本実験で得られた 81.1cycles/sec という速度はロボットビジョンに求められる数百、数千 cycles/sec という速度を達成できていない。これは、本実験で使用した CCD カメラは FT-CCD であるため、垂直転送部から蓄積部に信号電荷を転送する時間が 1~2[msec]かかり、また、カメラの露出時間が最短でも 1 [msec]にしか設定できず、カメラのフレームレートが最大でも 100frames/sec にしかならないためである。ただ、IT-CCD でも部分読み出し機能を実現しているカメラもあり、この場合露出時間は 0.1~1 [μsec] に設定することが原理上可能であるので、これにより精度を保ったまま、計測速度を向上させることが可能である。また、撮像素子が CMOS のカメラでは XY アドレス指定のランダムアクセスが可能であり、各画素のアクセス時間を 100[μsec]で実現しているカメラも開発されており、本研究で提案したように撮像素子を能動制御すれば、精度を保ったまま、高速なフレームレートを実現できるはずである。CMOS カメラは先に

述べたように任意の画素の部分読み出しを行うことが可能であるので本研究で行ったように部分読み出しの領域を平行線上に設定する必要もなく、より汎用性の高いシステムを構築することが可能である。

表 2 計測時間とその割合

	処理時間[msec]	割合[%]
スポット光投影	0.005	0.05
画像入力	10.373	98.64
座標計算	0.019	0.18
運動パラメータ算出	0.119	1.13

表 3 部分読み出しと全画素読み出しの比較

	読み込み画素数	画像入力時間[msec]	全体の処理時間[cycles/sec]
部分読み出し	約6千	10	81.1
全画素読み出し	約32万	237	4.1

6. 計測精度の検証

本システムによって計測できる、物体の並進パラメータおよび回転パラメータの計測精度を検証するため、以下の2実験を行った。

実験 1：世界座標系軸方向への平行移動を行い、移動距離の真値と計測データの比較を行う。

実験 2：立方体を回転させ、回転行列から回転角度を算出する。回転角度の真値と計測値の比較を行う。

実験 1 は並進パラメータの精度評価であり、実験 2 は回転パラメータの精度評価である。

6.1 平行移動の精度評価

6.1.1 実験方法

Z 軸方向の精度評価を行うのはステージの構造上難しいため、X 軸と Y 軸の精度評価を行った。まず、図 8 のように立方体の一边が移動方向に対して平行になるように基準立方体をリニアステージの上に載せる。立方体の辺に沿って世界座標系を設定するため、このように置くと世界座標系の X 軸あるいは Y 軸とリニアステージの移動方向を一致させることができる。そして、グレイコードパターン光投影法によりキャリブ

レーションを行う。次に、カメラのレンズから捕らえられる立方体の 3 面に対してスポット光をそれぞれ 3 点ずつ投影する。本手法ではスポット光の切り替えを行っていないので、物体の追従可能範囲が狭い。よって、投影するスポット光は X 軸あるいは Y 軸の正方向に偏らせてある。

そして、スライドステージを 5.0[mm] ずつ X 軸 Y 軸いずれも正方向に平行移動しながらの点 P の座標を算出し、真値との精度評価を行った。

また、立方体はカメラの画面中央に配置して行った。従って、カメラで撮影した画面内での立方体は、X 軸方向の移動では中央から右上へ、Y 軸方向の移動では中央から左上へ移動する。

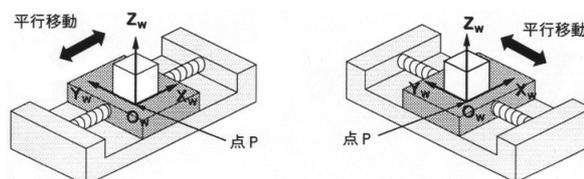


図 8 リニアステージと立方体

6.1.2 結果および考察

X 軸方向へ平行移動したときの立方体 P 点の X 座標の変化を図 9 に示す。グラフの水平軸はスライドステージの移動距離を表し、垂直軸はスライドステージを 5 [mm] ずつ移動させたときの X 座標の平均値およびその標準偏差を表している。また、Y 軸方向へ平行移動したときの精度評価についても同様に図 10 に示す。全体の標準偏差は X 軸方向移動の時は 0.72[mm]、Y 軸方向移動の時は 0.72[mm] であった。

図 9、図 10 より、5 mm ごとの移動は X、Y 両方の軸方向の移動について検出できていると言える。今回、カメラから物体の距離が約 1.5[m] あることを考慮すると十分な精度を得ることができているといえる。

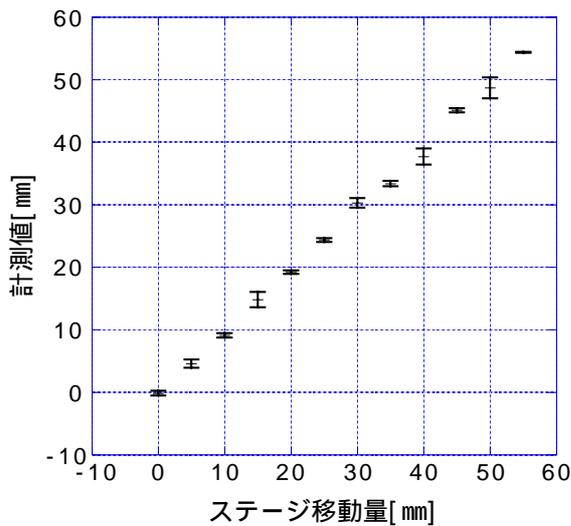


図 9 X 軸方向移動時における精度

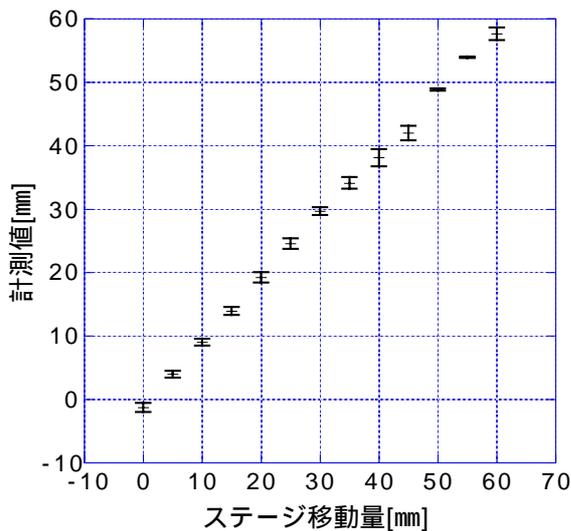


図 10 Y 軸方向移動時における精度

6.2 回転移動の精度評価

6.2.1 実験方法

X 軸と Y 軸周りの回転の精度評価を行うのは困難であるため、Z 軸周りの回転の精度評価のみを行った。

まず、図 11 のように立方体を回転ステージ上に載せる。回転時の精度評価を行うため、立方体の重心をステージの回転軸上に完全に一致させる必要があるが、そのためには、立方体の一辺と、ステージ台座の直径がほぼ等しいことを利用して、できるだけ一致するように調節し

た。誤差を小さくするため、各平面に投影したスポット光によりできる三角形は面積を大きく、形は正三角形に近い形となるようにした。そして、図 11 において矢印 R の方向に 2[deg] ずつ、合計 16 [deg] まで回転させ、運動パラメータの計測を行った。また矢印 L の方向に対しても同様な実験を行った。矢印 R の方向の回転を正とした。

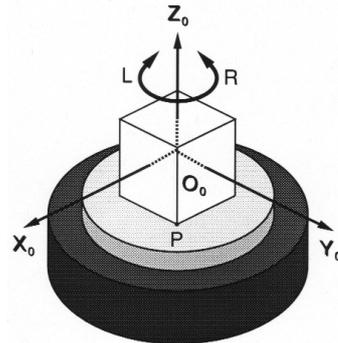


図 11 回転移動

6.2.2 結果および考察

R 方向、L 方向にステージを 2[deg] ずつ回転させたときの Z 軸周りの回転量の計測値の平均値およびその標準偏差を図 12 に示す。全体の標準偏差は 0.58[deg] であった。検出角度の精度は 2[deg] の回転ならば、その差をほぼ検出することはできるが、検出角度の精度は良いとはいえない。これは、投影するスポット光の数が少ないため、スポット光の 3 次元座標算出の誤差が運動パラメータの算出に影響するためである。特に、立方体の上面に投影されるスポット光は他の面と比べ投影角度が浅いため、投影したスポット光の反射光の面積が大きくなる。本実験ではスポット光の検出を投影前の画像との差分により行っているため、スポット光の面積が大きくなると誤差が大きくなる。また、キャリブレーションの誤差により投影するスポット光の位置がずれた場合においても、投影角度が浅いとスポット光の反射光の位置の誤差も大きくなってしまう。

しかし、物体とカメラの距離が 1.5[m] であることを考慮すると、十分な精度が得られている

ことがいえる。

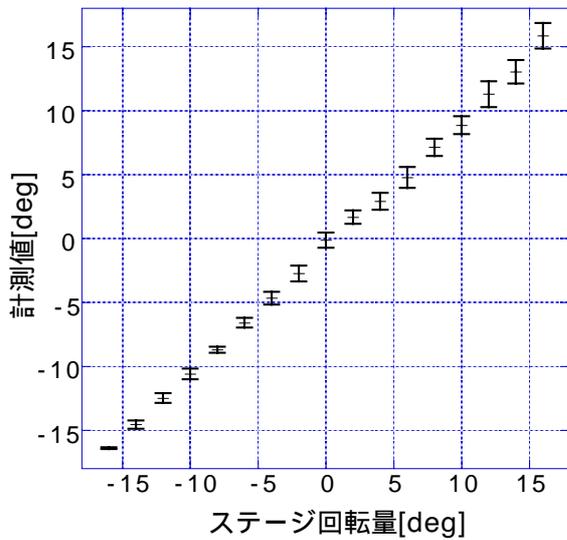


図 12 回転誤差

7. まとめ

本研究では、撮像素子を能動制御することにより画像の読み込む領域を限定し、読み込み時間を短縮することによって、解像度を同一に保ったまま、80cycles/sec 以上の高速な 3 次元画像計測を実現した。これにより、本手法により従来の NTSC 規格に沿ったカメラと同等な解像度を保ちながらも高速な処理が行えることを実証できた。

ところで、本システムは多くの拘束条件をともなっている。物体のモデルが既知であることや、スポット光の切り替えを行っていないため、物体の追跡可能範囲が狭いことなどある。その中でもカメラとプロジェクタの位置姿勢を拘束することは非常に大きな条件である。これは、今回使用したカメラが CCD カメラであるため、部分読み出しのできる領域が任意指定の 1 次元の部分読み出しであるからである。しかし、撮像素子には CCD のような電荷転送型に対し、C-MOS などのように XY アドレス型の転送方式のものが開発されている。この方式は図 13 のように各画素が水平、垂直シフトレジスタに接続されており、各画素に順次選択パルスを送ることにより任意の画素の部分読み出しが可能である。

このようなカメラを用いればカメラ、プロジェクタの位置姿勢の拘束条件をはずして計測することが可能となる。また、本システムでは、エピポーラ線上の全ての画像の信号を読み出していたが、これまでの移動の軌跡から次の移動範囲を予想し、エピポーラ線上にて部分読み出しの範囲を現在検出しているスポット光の位置の近傍に設定することにより、読み出す信号量を減少させることが可能であり、より高速な計測が行えると考えられる

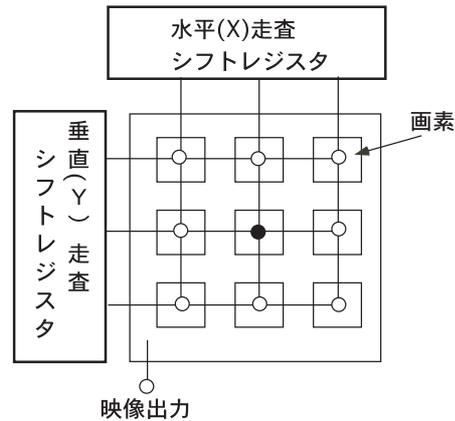


図 13 XY アドレス型の撮像素子の転送方式

参考文献

- [1] J.Aloimonos, I.Weiss : Active vision, IJCV, Vol.1, No.4, pp.333-356(1988)
- [2] 中坊嘉宏, 石川正俊, 豊田晴義, 水野誠一郎 : ビジュアルフィードバックのための 1ms 列並列ビジョン(CPV)システム, 第 5 回ロボティクスシンポジウム論文集, 22C2, pp.375-380(2000)
- [3] 三田雄志, 日浦慎作, 加藤博一, 井口征士 : 投影パターンの戦略的変更による多面体追跡, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.6, pp.1953-1964 (Jun. 1998)
- [4] 井口征士, 佐藤宏介 : 三次元画像計測, 昭晃堂(1990)