

修士論文

ハードウェア制御による  
高速三次元計測システムの構築と評価

新宅宏彰

東京大学大学院 工学系研究科 電子工学専攻

学籍番号 36378

指導教員 池田 誠 助教授

2006 年 2 月 3 日

## 目次

1.	序論 .....	1
1.1.	研究の目的と背景 .....	1
1.2.	三次元計測手法 .....	3
1.2.1.	能動的な手法 .....	3
1.2.2.	受動的な手法 .....	3
1.3.	本論文の構成 .....	5
2.	光切断法を用いた三次元計測 .....	6
2.1.	光切断法の原理 .....	6
2.2.	高速輝度検出スマートイメージセンサ .....	7
2.3.	三次元情報取得のためのキャリブレーション .....	11
3.	高速三次元計測システムの提案 .....	21
3.1.	三次元計測システムの概要 .....	21
3.2.	三次元演算モジュール .....	24
3.3.	グラフィックコントローラ .....	29
3.4.	データ転送バス .....	32
4.	高速三次元計測の実験 .....	36

4.1.	測定システム .....	36
4.2.	三次元演算モジュールのシミュレーション .....	37
4.3.	二次元画像の取得と表示 .....	39
4.4.	輝度検出結果と表示 .....	40
4.5.	三次元計測データによる三次元演算結果と表示 .....	42
5.	結論 .....	44
	本研究に関する発表 .....	45
	参考文献 .....	46
6.	謝辞 .....	49

## 図目次

図 1：三次元計測手法 .....	4
図 2：光切断法の原理 .....	6
図 3：スマートイメージセンサのアーキテクチャ .....	9
図 4：回路原理とその動作[7] .....	10
図 5：カメラ座標，プロジェクタ座標とワールド座標の関係 ..	14
図 6：カメラ座標とワールド座標との関係 .....	15
図 7：対応点検出法 .....	20
図 8：従来の三次元計測システムの概念図 .....	22
図 9：従来の三次元計測モジュールのブロック図 .....	22
図 10：提案する三次元計測システムの概念図 .....	23
図 11：提案する三次元計測システムのブロック図 .....	23
図 12：三次元演算モジュールのブロック図 .....	27
図 13：三次元演算ブロックのパイプライン構成 .....	28
図 14：sin の多項式近似による誤差評価 .....	28
図 15：VGA のグラフィックコントローラのブロック図 .....	30
図 16：VGA のグラフィックコントローラの描画概念図 .....	30
図 17：水平同期のタイミングチャート .....	31

図 18：垂直同期のタイミングチャート .....	31
図 19：I2C コントローラのブロック構成及びタイミング図 ..	32
図 20：バスのブロック図 .....	33
図 21：バスの動作タイミング図 .....	33
図 22：2D モードでのデータ転送の様子 .....	34
図 23：3D モードでのデータ転送の様子 .....	34
図 24：三次元計測システムの写真 .....	36
図 25：測定対象 .....	37
図 26：PC/ソフトウェア処理によるデータ .....	38
図 27：シミュレーション結果 .....	38
図 28：二次元計測結果によるディスプレイ表示の様子 .....	39
図 29：光投射による輝度部のエッジ検出結果 .....	40
図 30：シート光投射による反射光のエッジ検出の様子 .....	41
図 31：三次元計測結果 .....	43

# 1. 序論

## 1.1. 研究の目的と背景

近年の三次元映像情報技術には目を見張るものがある．三次元情報技術と一口に言っても，その中には車両搭載型距離情報取得システム[1]，ホログラムを使った三次元ディスプレイ[2]，テレビなどで利用される任意視点の形成[3]，人体内部の三次元情報の取得[4]など様々な技術が存在する．三次元情報はメディア，交通，医療など多様な分野で我々の日常生活に利用されていることがわかる．三次元情報技術は大きく分けると情報の表示，取得，作成に分類されるが，中でも三次元情報の取得に対する重要性は大きい．三次元情報取得技術において，情報取得の高速性は最も重要な要素の一つとしてあげられる．高速な三次元情報取得の実現は，多岐にわたる分野に更なる発展を促すからである．昨今，高速な三次元情報取得について，多くの研究が行われてきており，高速に三次元情報を取得するために，これまではハードウェアレベルでの解決やソフトウェアレベルでの解決など様々な提案が行われてきた．なかでも，ハードウェアレベルでは数多くの解決手法が提案されている[5][6][7][8][9]．そもそも，三次元情報の取得方法としては大きく分けて2種類に分けることができる．一つは受動的な三次元計測手法であり，二つ目として能動的な三次元計測手法である．前者である受動的な手法として，ステレオマッチング手法[3]，因子分解法に基づく Shape from Motion[10]，などが挙げられ，能動的な手法として，光投影法，光切断法[7][8]や Time of Flight(TOF)[9]などが挙げられる．これらの手法はさまざまな特徴を持ち，それぞれの特徴に適した手法が各々適応されている．さらに近年ではステレオマッチング手法と光投影法を組み合わせた手法[11]なども提案されている．ハードウェアレベルにおける高速な三次元計測としては，能動的な手法によるものが多い．能動的な手法において，さらに三角測量に基づく手法として代表される光切断法による三次元計測センサ[5][7][12]や TOF 手法[9]を用いた三次元計測センサが数多く上げられ，盛んに研究されている分野の一つであり，高速な三次元情報取得がハードウェアレベルで実現可能になってきている．しかしながら，三次元情報の取得，演算，表示といったシステムレベルについて注目すると高速センサレベルに追いついて

いるとはいえない．たとえば，光切断法に基づく VGA (640x480pix．) クラス三次元センサにおいて，30frame/sec で三次元計算した場合，単純に計算しても， $10\text{bit} \times 480 \times 640 \times 30 = 11.5\text{MB/s}$  必要となる．近年の，高解像度化により 1M クラスのセンサが実現している事を考えると， $\sim 100\text{MB/s}$  必要となってくる．これがわかる．これをシステムレベルにおいて実現することは難しくなってくる．

また，三次元メディアの普及にあいまって，任意視点の三次元情報，つまり対象の周囲の三次元情報(以下，三次元モデルと呼ぶ)の取得への要求が高くなってきている．対象の三次元モデル取得は三次元情報のさまざまな分野への積極的な応用を促すことが最大の特徴の一つとして挙げられる．たとえば，実際にスポーツ映像においては複数のカメラを用いて空間幾何学を利用することによって，数台のカメラのみからは得ることのできない視点からの映像が生成され，提供されている[3]．ただし，文献[3]のような技術では，リアルタイムで任意視点での画像を生成する場合，対象の完全な三次元モデルを算出はしておらず，複数のカメラからの画像を用いて，ある視点における二次元画像を幾何学構造を元に生成しているに過ぎない．モデルベースな情報を取得するためには，明示的に三次元情報を取得する必要がある．それらを高速に行うとなると容易ではないと言える．三次元モデルは，各方向からの三次元情報取得のための三次元演算に必要な前情報の取得，計算による三次元情報の生成，描画などの工程を経ることによって，実際に人の目に触れることとなる．しかしながら，これらの作業量は各々の工程のみでさえも膨大な量となり，バス転送，データ処理の増大は深刻な問題である．近年の，計算機の高性能化による恩恵により，各々の処理時間は短縮されたものの，未だすべての需要を十分に満たす手法，および，技術は確立されているとは言えない．上述したように一方向における三次元情報でさえ，十分な処理速度転送速度を実現しているといえないことから判断しても，三次元モジュールが複数台配置された場合の問題の深刻さはいうまでもない．

本研究室にて，高速三次元センサが提案されている．また，任意視点三次元計測において，任意視点三次元計測システムも提案されている．ただし，これまでに述べたように各三次元情報取得におけるデータの転送処理問題に大してなんら実現していない．さらに任意視点散華人計測システムにおいては複数台数増えれば増えるほどデータ処理転送速度に問題が生じてくる．そこで今回は三次元計測におけるシステムレベルにおける処理，転送等の問題に対する解決手法を提案し，高速な三次元転送システムを実現することに成功した．

## 1.2. 三次元計測手法

### 1.2.1. 能動的な手法

三次元計測における受動的な手法として上述した通りさまざま挙げられる．受動的な手法の中でも最も一般的かつ，単純な手法として，ステレオマッチング手法が挙げられる．図[1](a)にその様子を示す．ステレオマッチング手法は 2 台，もしくはそれ以上の複数の位置の異なるカメラを用いて対象の三次元形状を取得する方法である．各カメラから対象の二次元画像を取得し，取得画像上における対象の特徴点を探索結果を元に，三角測量に基づいて特徴点の距離を検出する．カメラのみで三次元距離を取得することが可能であり，得られた二次元画像をマッピングすることにより，よりリアリティのある三次元形状を復元することが可能となる．しかしながら，距離精度を得ようとする場合，マッチング精度を上げなければいけない．その結果，マッチング処理量が増大し，三次元情報取得時間の増大を招く．また，三次元情報取得時間を短縮しようすると，マッチング精度を劣化させざるを得ない．このようにステレオマッチング手法には本質的に特徴点探索と距離精度において致命的なトレードオフの問題が生じる．他にも，特徴点を取得する際に，マッチング精度が測定対象の反射率などのコンディションに大きな影響を受けるといった問題を生じる．他の受動的な手法としては，文献[10]のように，因子分解法を用いて三次元情報を取得するする手法がある．測定した物体の三次元情報を表す計測行列の特異値分解の結果として得られる形状の行列を用いて移動物体を分割し，動物体の三次元情報を取得することが可能である．しかしながら，この方法でも，アルゴリズムにおける解を安定させるために，ステレオマッチング手法同様，画像上で多数の特徴点の対応をとる必要があり，また，少ない特徴点で行う場合には，どのような特徴を選択すべきかなどの系統的な方法は示されていないといった問題点を抱えている．受動的な手法には以上のような問題点はあるものの，カメラのみを用いるだけで，簡単に三次元情報を取得することのできる魅力から，さまざまな分野で応用されている．

### 1.2.2. 受動的な手法

能動的な手法とは，能動的という意味からわかるように，測定対象に対し，積極的に三次元情報取得のためのアプローチを試みる手法として定義される．能動的な手法の代表的な手法として，Time of Flight 手法[9]，光投影手法[13]などさまざまあるが，その中の一つとして今回用いる光切断法が挙げられる．

図[1](b)にその様子を示す．光切断法とはカメラとビームプロジェクタを用いて，レーザビームを積極的に対象に投射し，その対象に投射された光の反射光の位置をカメラで認識することによりステレオマッチング手法同様，三角測量に基づいて三次元情報を取得する．光切断法は特徴点を積極的に対象に対し，生み出すことによって，マッチング処理を不要とし，それに伴い高精度かつ低演算量で三次元情報を取得することを可能としている．一方で，光切断法を用いて三次元計測を行う場合一度の光の投射で，投射された位置のみの三次元情報しか得ることができない．たとえば，図[1](b)に示すようにスポット光ではなく，光をシート状に伸長して投射することによって測定範囲の次元を一つ減らしたとしても投射光の走査回数を増やさなければ，測定範囲全体の領域を測定することはできない．たとえば 640x480(VGA)相当で，30 frames/s の三次元情報を得るためには 19 k[frame/s]のイメージセンサが必要であり，一般に使用されているイメージセンサでは高速撮像を行うことができず，その実現は難しい．この問題に対し，後述するが今回は本研究室で開発された 65.1 range frames/s で三次元情報を取得できる 47k[frame]で撮像可能なイメージセンサ[7]を使用することで解決する．

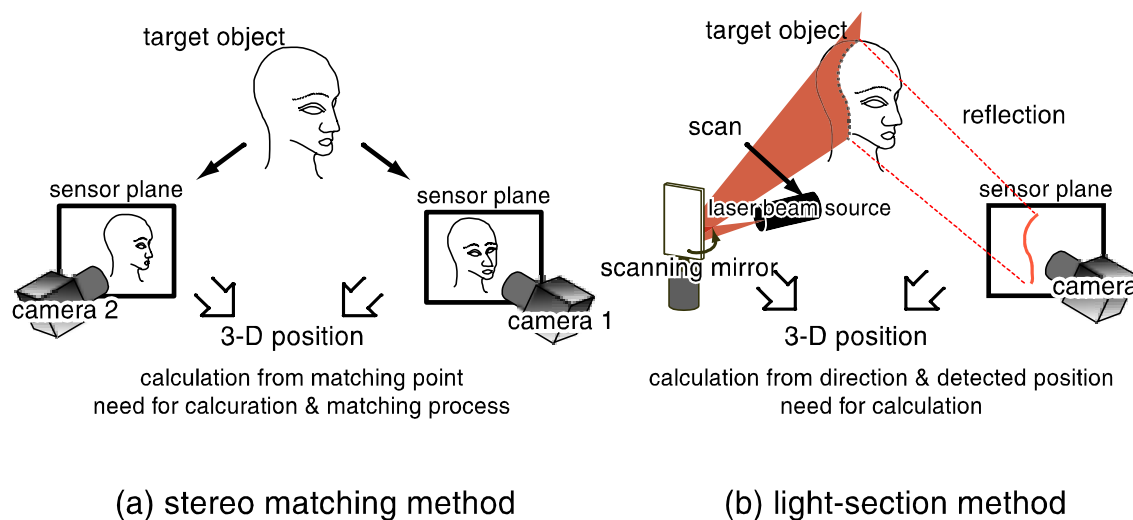


図 1：三次元計測手法

(a)ステレオマッチング手法(受動的手法)，(b)光切断法(能動的手法)

### 1.3. 本論文の構成

前節までに述べたように，本論文では，三次元情報取得のためのデータ転送，処理システムにおけるボトルネックを解消する高速なオンボード三次元演算システムを提案する．第二節では高速化を実現した単一方向から三次元センサを用いたときの三次元計測，計測結果[14]について，複数方向から三次元計測する際に行う必要のあるキャリブレーションによる三次元計測[15]について述べる．第三章では第二章を踏まえて高速な三次元演算処理システムについて述べる．第四節では，提案した三次元演算処理システムについての三次元計測速度実験結果についての実験結果について述べる．最後に第五節で全体のまとめと結論について述べる．

## 2. 光切断法を用いた三次元計測

本章では本論文で用いる三次元計測手法である光切断法について言及し，光切断法における投射光の輝度検出を高速に行うスマートイメージセンサの原理，特徴について述べる．さらに，スマートイメージセンサを用いた光切断法に基づく高速高精細三次元計測システムについて述べる．

### 2.1. 光切断法の原理

三角測量の原理に基づいた距離計測手法の一つである，光切断法手法の原理を示す．計測システムはスマートイメージセンサを搭載したカメラとシート状の光を投射するプロジェクタによって構成されているレンジファインダーを用いる．三角測量に基づく光切断法による三次元情報取得の様子を図[2]に示す．図[2]中のカメラ座標の位置を  $c$ ，プロジェクタの位置を  $p$  とする．光を投射して得られる，ある測定点  $m(X, Y, Z)$  に対して， $\angle mpc = \alpha_1$ ， $\angle mcp = \alpha_2$ ，さらに点  $c$ ，点  $p$  と測定点  $m$  とが同時に存在する平面と  $x$ - $z$  平面がなす角を  $\theta$  とする．点  $m$  を測定することによって得られる  $\alpha_1$ ， $\alpha_2$  と点  $cp$  間の距離  $d$  を用いると測定点  $m$  の三次元座標は以下のようにして求めることができる．

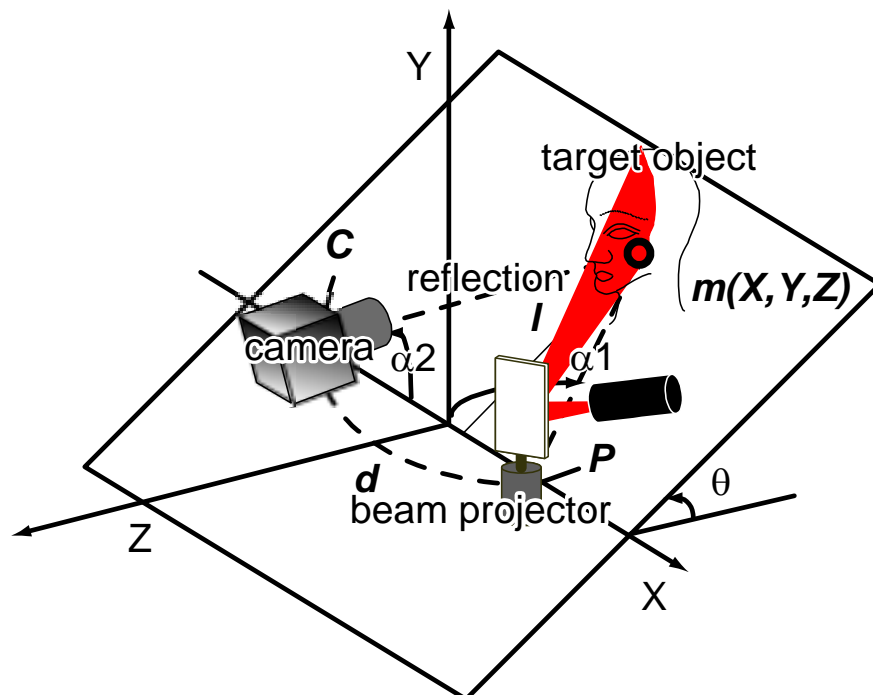


図 2：光切断法の原理

1, 2, は図より以下の関係で表すことができる．

$$\tan(\alpha 1) = \frac{l}{d/s - X} \quad [1]$$

$$\tan(\alpha 2) = \frac{l}{d/s + X} \quad [2]$$

ここで  $l$  は測定点  $m$  から  $x$  軸へ下ろした垂線の足の長さである．上式を  $l, X$  について展開すると以下ようになる．

$$X = \frac{d(\tan(\alpha 1) - \tan(\alpha 2))}{2(\tan(\alpha 1) + \tan(\alpha 2))} \quad [3]$$

$$l = \frac{d(\tan(\alpha 1) - \tan(\alpha 2))}{(\tan(\alpha 1) + \tan(\alpha 2))} \quad [4]$$

さらに  $Y = l \sin(\theta)$ ,  $Z = -l \cos(\theta)$  であることを用いると,

$$Y = \frac{d(\tan(\alpha 1) \tan(\alpha 2) \sin(\theta))}{\tan(\alpha 1) + \tan(\alpha 2)} \quad [5]$$

$$Z = \frac{d(\tan(\alpha 1) \tan(\alpha 2) \sin(\theta))}{\tan(\alpha 1) + \tan(\alpha 2)} \quad [6]$$

となり、三角測量の原理に基づいて測定点  $m$  の三次元座標を得ることができる．

## 2.2. 高速輝度検出スマートイメージセンサ

光切断法に基づいた実時間三次元計測システムを実現するために、距離計測で必要な情報である投射光の位置のみを高速に取得できるイメージセンサ[7]のアーキテクチャ、および回路構成について述べる．このセンサは、VGA(640x480pixel)の解像度を持つイメージセンサとしては、最速で実時間三次元計測を実現することの可能なイメージセンサである．

図[3]にスマートイメージセンサの高速な読み出しとポジション検出の手順

の様子とセンサの機能ブロック図を示す．一般的な CMOS APS と同様，3 トランジスタの画素回路構成を用いており，高解像度を実現している．イメージセンサの画素構造は図[3]で示す．二次元画像はイメージセンサの画素毎にアクセスし，電圧値を外部の AD コンバータを介して 8bit 階調のデジタル値として出力することによって取得可能となっている．次に三次元情報取得の際に投射光の高速なポジション検出について述べる．三次元情報取得の際には画素ごとではなく行単位でアクセスを行う．まず，はじめに図[3](I)において，選択する行をプリチャージしておき，プリチャージの際のダイナミック回路を用いて読み出しを行う．このとき，選択された行の電圧値は出力線の電位が減衰する速度に反映される．次に，図[3](II)における適応閾値回路では選択された行の電圧値が出力線の電位が減衰する速度に反映されることによって生じる遅延各列を利用して，入力光の輝度が最も暗い画素から一定の輝度値・ $E_{th}$  以上輝度の強い画素を有意画素として検出する．図[3](III)では検出された有意画素は時間領域の遅延を利用して近似的な AD 変換によって有意画素を 8 階調の輝度の分布に変換する．これらの有意画素は図[3](IV)でのプライオリティエンコードによって高速にアドレス情報に変換される．同図(c)選択に投射されたシート光の位置の選択の様子を示す．投射光の反射光がイメージセンサに入射されたときに一定の輝度・ $E_{th}$  の画素を有意な画素として選択する．その有意画素中のシート光の左右端の二つのアドレス情報を出力し，後に出力されたアドレスの中間のアドレスをシート光の位置として決定する．さらに，図[3](V)で時間領域での遅延を利用し近似的に AD 変換された 8 階調の情報を出力する．投射光の多階調化を行いサブピクセル精度の向上を実現している．

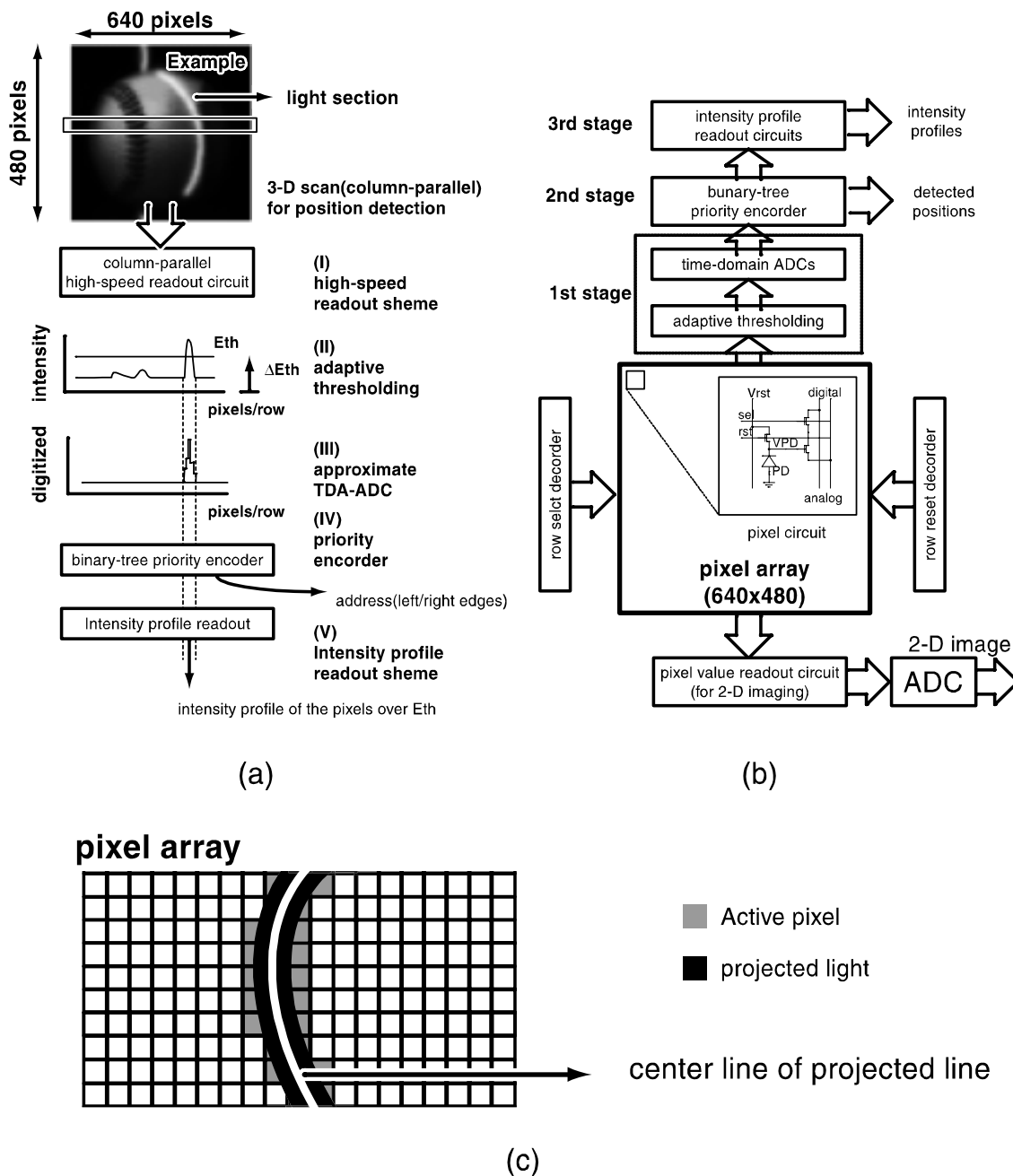


図 3：スマートイメージセンサのアーキテクチャ

図[3]に以上の動作を実現した回路を示し，具体的な動作について述べる．画素回路において三次元画像の取得時には通常二次元画像撮像時に VDD に接続されているノードを列毎に独立した出力回路に接続しておく．そこで，任意に設定可能なプリチャージ電圧  $V_{pc}$  やリセット電圧  $V_{rst}$ ，さらには，有意画素を決める比較電圧などを  $V_{cmp}$  用いて輝度の高い画素を検出する．

図中にはプリチャージ回路，2値化回路，トリガ発生回路，遅延回路，センスアンプ，エンコーダ，ラッチから構成された適応閾値回路と高速な近似AD変換回路を示してある．適応閾値回路の出力を得て近似AD変換回路は動作し，図[4](a)に示すように，投射された光の入射光の強度が強い画素ほど出力  $V_{col}$  の電位の降下は遅い． $V_{cmp}$  と比較し， $V_{cmp}$  を越えた時点で一齐にトリガをし(CMP)，その後は輝度値に応じて図[4](b)のように画素値を反映した到達時間で出力されることになる．図[4](c)に示すように適応閾値回路では最初に到達した出力 CMP1，すなわち最も入射光強度が弱い画素の出力を基準として一定時間  $T_{th}$  だけ遅延して全ての列に対してラッチセンスアンプのクロック DCK0 を発生させ，各列初段のラッチセンスアンプは DCK0 発生タイミングにおける出力信号 CMP を保持する．DCK0 より前に出力が到達している列は輝度閾値  $E_{th}$  よりも弱い輝度の画素であり，DCK0 よりも後に出力が到達した画素は有意画素となる．さらに DCK0 は近似AD変換の解像度に相当する遅延時間  $T_{res}$  だけ遅延した信号 DCKi として2段目以降のラッチセンスアンプを順番に作動させていく．結果的に図[4](b)に示すように有意画素の出力が到達した時間を保持することになる．この結果は有意画素の画素値を表し，選択的に読み出すことでシート光の輝度分布を得ることができる．

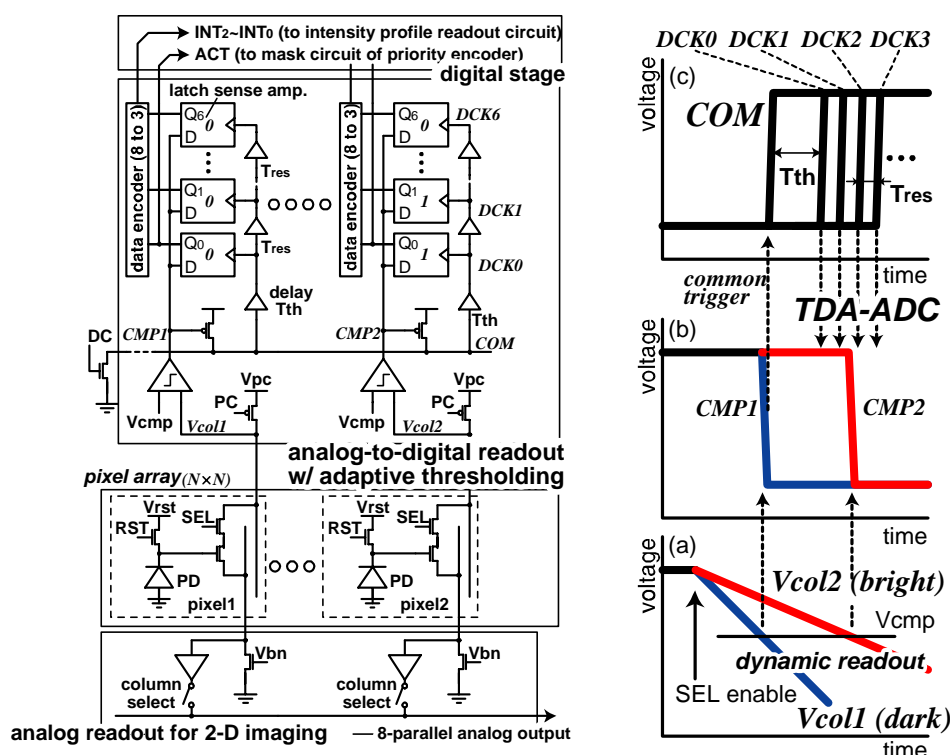


図 4：回路原理とその動作[7]

## 2.3. 三次元情報取得のためのキャリブレーション

前節では高速にプロジェクタからの投射光の位置を検出するスマートイメージセンサ[7]について述べた．本節では，前述のレンジファインダーを複数台用いることによって，対象の三次元モデルを取得する手法[15]について述べる．この手法では，複数のレンジファインダーを用いた場合に生じる対象の三次元モデルの精度に関する問題やシート光の判別による問題を解決する．

光切断法において複数方向から三次元計測し，それらをワールド座標中に三次元モデルとして構築する場合，計測システム中のさまざまな特性を知る必要がある．たとえば，各レンジファインダーにおける特性や，座標空間の各レンジファインダーにおける座標と対象の存在するワールド座標との関係である．ここで取得した特性などに誤差などが含まれていた場合，その特性を元に，演算した三次元計測結果は，三次元モデルにゆがみや位置のずれなど致命的な誤差を生じてしまう恐れがある．そこで，三次元計測誤差を低減するためには各レンジファインダー座標内のプロジェクタ，カメラの光学系の特性や相対関係，各レンジファインダー同士の相対関係を正確に知る必要がある．上記のようにカメラの特性情報を取得することをキャリブレーションという．

多くの手法は，三次元空間中のワールド座標において三次元の基準点を用意し，この既知の座標を画像に取り込み，その画像上での座標を用いてワールド座標系とカメラ座標系の相対関係，すなわちカメラの位置と姿勢やカメラの光学系のパラメータを求める手法が主流である．キャリブレーション手法に関する研究は前述した通り，数多くなされている[16]．代表的な手法としてTsaiによる手法[16]などが挙げられる．この手法は平面基準点を用いて2台のカメラの同時キャリブレーションを行う方法であり，非線形成分も考慮した手法である．ワールド座標とカメラ座標との相対的な位置は回転行列と平行移動ベクトルで表され，これを外部パラメータ，カメラの光学系の特性である焦点距離，画像中心や非線形成分を含めたレンズのゆがみなどを内部パラメータと呼び，これらを求める．これらのキャリブレーション手法は非線形成分も考慮することにより，非線形成分によるキャリブレーション精度の向上は期待されるものの，非線形成分が存在するためハードウェア内で非線形成分のキャリブレーションパラメータを含めた三次元演算を行うことは複雑となり，容易とは言えない．そこで，近年の光学系レンズの発達によりレンズの歪みによる非線形成分は微少であることから非線形成分を線形化し，さらに各座標軸の回転による非線形成分は線形化することによって，演算を単純化する．

カメラがあらゆる状況下で使用されるようになった結果，対応点数の問題に比べ誤差の取り扱いやその誤差のもとでの簡便かつ高速に，しかも安定にパラメータを算出することに注目が集まっている[17]．これは，特徴点を用いたキャリブレーションにおける対応点検出時の，その認識処理にはノイズや光源環境の変化などの影響を受けやすく，その影響による誤差そのものが，たとえば事後処理である三次元演算に大きな誤差を招く恐れがあることに起因する[18]．以上のように，カメラキャリブレーションは三次元演算にとって，重要な研究事項であり，盛んに研究されている．以上のような背景を踏まえ，本論文では，環境による影響が比較的小さくなるように複数の対応点数を用いキャリブレーションを行う．さらに，高速な三次元計測のためにハードウェア内で三次元演算を行う必要があることから，その実現が十分可能となることを目的として，線形幾何学構造に基づくキャリブレーション手法[17]について述べる．この手法は，前提として，回転やレンズの歪みによる非線形成分は三次元計測において十分小さいということに前提とした手法である．ここでは，光切断法のレンジファインダー内およびレンジファインダー間の特性を較正する手法として空間中の座標関係を用いた手法[17]について簡単に説明を述べる．各座標間の関係を図[5]に示す．ここである一つのレンジファインダーにおけるカメラ座標について注目してみる．図[6]にカメラ座標と画像平面との関係を示す．レンジファインダー $n$ における点 $i$ のカメラ座標値に対応する画像平面状での点を $(X_i^n, Y_i^n, Z_i^n)$ とすると，

それらの関係は

$$u_i^n = F \frac{X_i^n}{Z_i^n} + u_0^n \quad [7]$$

$$v_i^n = F \frac{Y_i^n}{Z_i^n} + v_0^n \quad [8]$$

と表される．ここで $F$ は焦点距離で $(u_0^n, v_0^n)$ は画像平面上で光軸が通る点である．

さらに図[6]に示したようにワールド座標値を $(X_{wi}, Y_{wi}, Z_{wi})$ ，さらにその点に対応したカメラ座標値を $(X_i^n, Y_i^n, Z_i^n)$ とすると，両座標間の関係は以下のような式で表される．

$$\begin{pmatrix} X_i^n \\ Y_i^n \\ Z_i^n \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ Z_{wi} \end{pmatrix} + t \quad [9]$$

ここで，R は座標間の回転行列，t は座標間の平行移動ベクトルであり，外部パラメータである．

回転行列 R は，x 軸のまわりに角度  $\gamma$  だけ対象を回転し，その新しい対象を y 軸のまわり，さらに z 軸のまわりに  $\beta$  だけ回転するものとするにより回転行列は以下のように得られる．

$$R = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad [10]$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\cos \alpha \sin \gamma + \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma & \sin \alpha \sin \gamma + \cos \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \alpha \cos \gamma + \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma & -\sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ -\sin \beta & \sin \alpha \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta \end{pmatrix}$$

ここで，R は  $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$  で表される，非線形パラメータである．そこで，これらのパラメータを，以下のように定義し，線形化する．

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad [11]$$

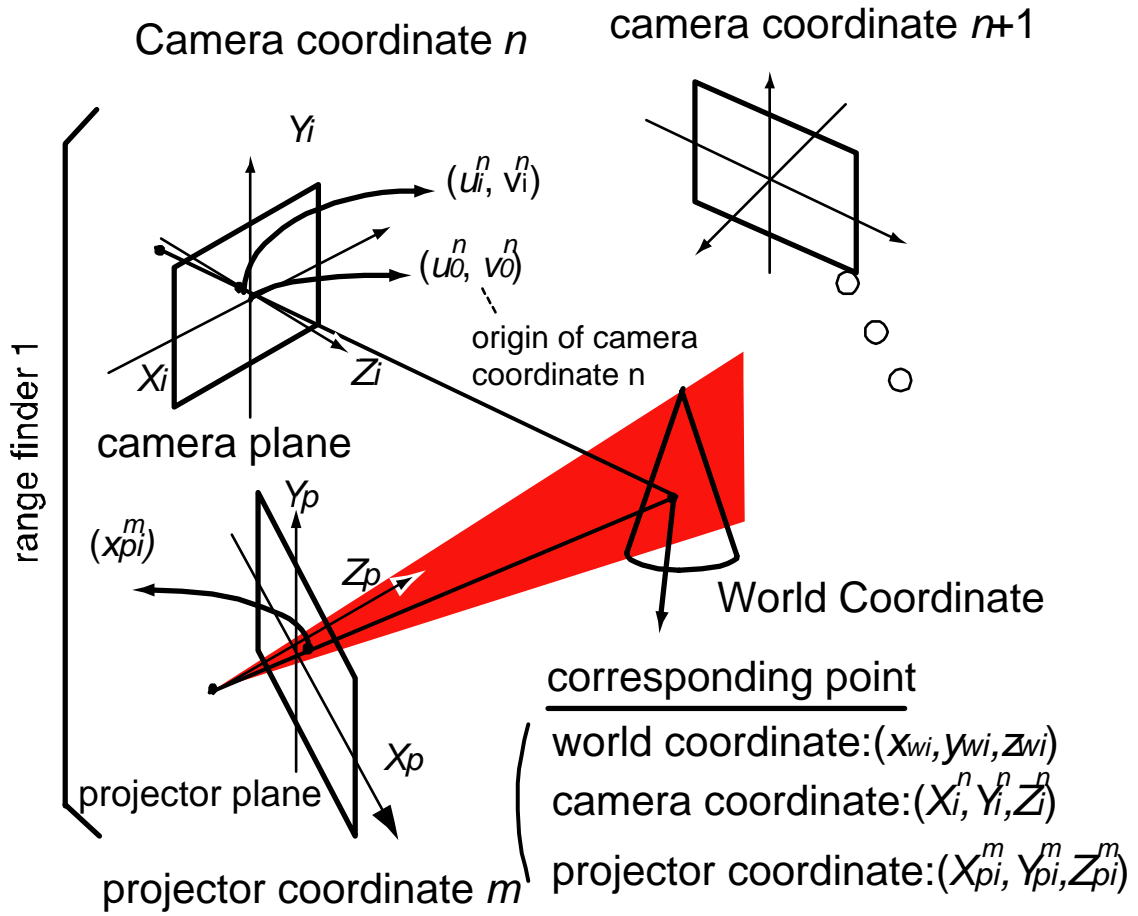


図 5 : カメラ座標 , プロジェクタ座標とワールド座標の関係

カメラパラメータを  $(C_{11}, C_{12}, \dots, C_{34})$  とし , 式[9]を式[7][8]に代入することによ

て  $(u_i^n, v_i^n)$  は以下のように表すことができる .

$$u_i^n = \left( \frac{c_{11}^n x_{wi} + c_{12}^n y_{wi} + c_{13}^n z_{wi} + c_{14}^n}{c_{31}^n x_{wi} + c_{32}^n y_{wi} + c_{33}^n z_{wi} + c_{34}^n} \right) \quad [11]$$

$$v_i^n = \left( \frac{c_{21}^n x_{wi} + c_{22}^n y_{wi} + c_{23}^n z_{wi} + c_{24}^n}{c_{31}^n x_{wi} + c_{32}^n y_{wi} + c_{33}^n z_{wi} + c_{34}^n} \right) \quad [12]$$

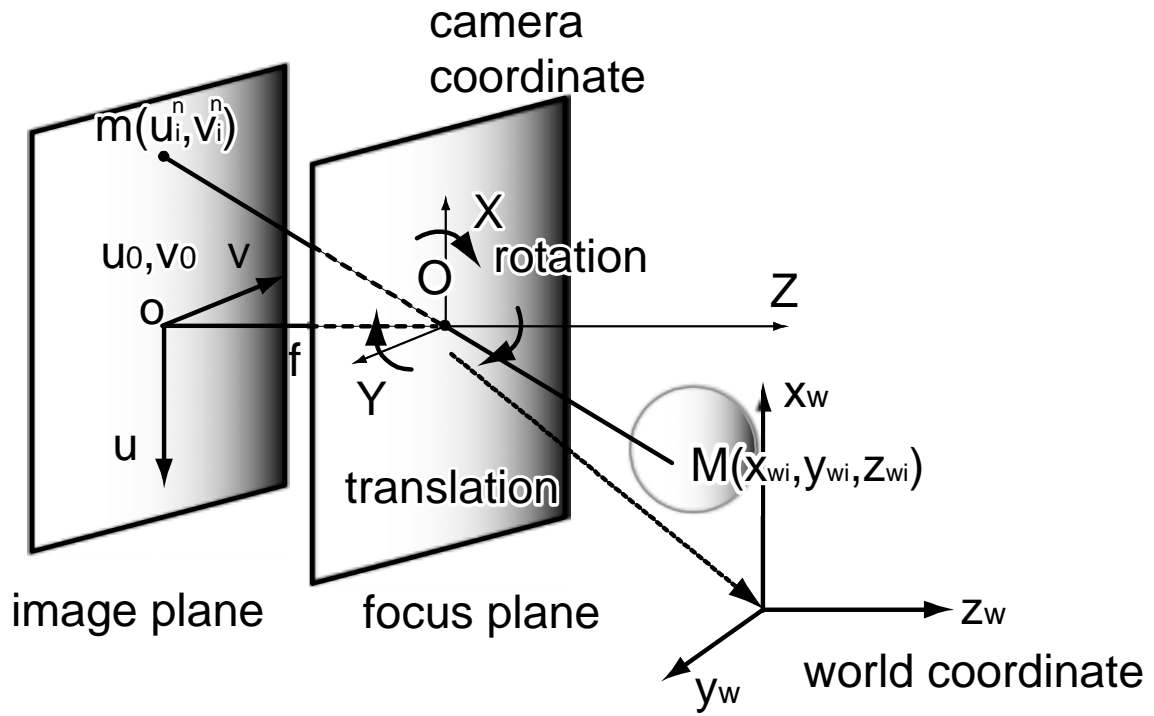


図 6 : カメラ座標とワールド座標との関係

また，ここでワールド座標と二次元座標に対応した  $i$  点のキャリブレーション点が得られた場合，式は  $C_{34}^n = 1$  とすることによって，以下のように展開することができる．

$$\begin{pmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1^n x_{w1} & -u_1^n y_{w1} & -u_1^n z_{w1} & -u_1^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -v_1^n x_{w1} & -v_1^n y_{w1} & -v_1^n z_{w1} & -v_1^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wi} & y_{wi} & z_{wi} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i^n x_{wi} & -u_i^n y_{wi} & -u_i^n z_{wi} & -u_i^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wi} & y_{wi} & z_{wi} & 1 & -v_i^n x_{wi} & -v_i^n y_{wi} & -v_i^n z_{wi} & -v_i^n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} C_{11}^n \\ C_{12}^n \\ \vdots \\ C_{33}^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1^n \\ v_1^n \\ \vdots \\ u_i^n \\ v_i^n \end{pmatrix} \quad [13]$$

上式では，12 個のカメラパラメータ  $(C_{11}^n, C_{12}^n, \dots, C_{34}^n)$  が存在し，1 点のキャリブレーションポイントが得られた場合，式[11][12]によって二つの式が得られることから，12 個のカメラパラメータを得るためには，少なくとも同一平面状にない 6 点の三次元座標と対応した画像上アドレスを求めればよい．

プロジェクタパラメータに関してもカメラパラメータを求めた手法と同様に行うことができる．ただしプロジェクタから投射される光はシート状であるのでカメラパラメータの場合とは違いプロジェクタ平面上の直行する軸の一つを無視することができる．ここで，点  $i$  へのプロジェクタから投射されるシート光の投影角度を  $x_p$  プロジェクタパラメータを  $(P_{11}^n, \dots, P_{24}^n)$  とすると，カメラパラメータ同様以下の式に展開できる．

$$x_{pi}^n = \left( \frac{P_{11}^n x_{wi} + P_{12}^n y_{wi} + P_{13}^n z_{wi} + P_{14}^n}{P_{21}^n x_{wi} + P_{22}^n y_{wi} + P_{23}^n z_{wi} + P_{24}^n} \right) \quad [14]$$

$i$  点の対応点が検出された場合に， $P_{24}^n = 1$  とすることによって，以下のように展開することができる．

$$\begin{pmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -u_{p1}^n x_{w1} & -u_{p1}^n y_{w1} & -u_{p1}^n z_{w1} & -x_{p1}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wi} & y_{wi} & z_{wi} & 1 & -u_{pi}^n x_{wi} & -u_{pi}^n y_{wi} & -u_{pi}^n z_{wi} & -x_{pi}^n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{11}^n \\ P_{12}^n \\ \vdots \\ P_{23}^n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{p1}^n \\ \vdots \\ x_{pn}^n \end{pmatrix} \quad [15]$$

ここで，プロジェクタパラメータは  $(P_{11}^n, P_{12}^n, \dots, P_{24}^n)$  の 8 つ存在することから，カメラパラメータのときと同様，少なくとも同一平面状にない 8 点のキャリブレーションポイントを求め，それに基づいて式[14]を解くことによってプロジェクタパラメータを求めることができる．

ここでは，前節のキャリブレーションパラメータを算出するために必要な対応点の検出について述べる．まず，式[13][15]を以下のように定義する．

$$A = \begin{pmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1^n x_{w1} & -u_1^n y_{w1} & -u_1^n z_{w1} & -u_1^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -v_1^n x_{w1} & -v_1^n y_{w1} & -v_1^n z_{w1} & -v_1^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wi} & y_{wi} & z_{wi} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_i^n x_{w1} & -u_i^n y_{w1} & -u_i^n z_{w1} & -u_i^n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{wi} & y_{wi} & z_{wi} & 1 & -v_i^n x_{wi} & -v_i^n y_{wi} & -v_i^n z_{wi} & -v_i^n \end{pmatrix} \quad [16]$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{11}^n \\ C_{12}^n \\ \vdots \\ C_{33}^n \end{pmatrix} \quad [17]$$

$$I = \begin{pmatrix} u_1^n \\ v_1^n \\ \vdots \\ u_i^n \\ v_i^n \end{pmatrix} \quad [18]$$

$$B = \begin{pmatrix} x_{w1} & y_{w1} & z_{w1} & 1 & -u_{p1}^n x_{w1} & -u_{p1}^n y_{w1} & -u_{p1}^n z_{w1} & -x_{p1}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wi} & y_{wi} & z_{wi} & 1 & -u_{pi}^n x_{wi} & -u_{pi}^n y_{wi} & -u_{pi}^n z_{wi} & -x_{pi}^n \end{pmatrix} \quad [19]$$

$$P = \begin{pmatrix} P_{11}^n \\ P_{12}^n \\ \vdots \\ P_{23}^n \end{pmatrix} \quad [20]$$

$$S = \begin{pmatrix} x_{p1}^n \\ \vdots \\ x_{pn}^n \end{pmatrix} \quad [21]$$

そうすることにより，以下のように定義することができる．

$$A \cdot C = I \quad [22]$$

$$B \cdot P = S \quad [23]$$

今回の手法においてキャリブレーションを行う場合に対応点を検出する必要がある．この対応点検出は最も重要で，対応点検出の精度が直接三次元演算の精度に影響をもたらす．つまり，対応点を正確に検出する必要がある．そこで対応点検出には図[7]に示すようにキャリブレーションターゲットに特徴点となるマーキングを行い，マーキングポイントを検出する．カメラパラメータにおいては，ワールド座標における特徴点  $(X_w, Y_w, Z_w)$  と撮像した二次元画像上

$(u_i^n, v_i^n)$  との対応をとればよい．対応点検出の際の精度が直接三次元検出精度に

影響をもたらすことから今回は，図[7] (a) に示すように二次元画像中に検出されたマーキングのアドレス値の座標値の重心をとることにより正確に対応点検出を行う．マーキングポイントの領域に存在する二次元画像上のアドレスを有意画素とし，それらの有意画素において重心をとる．またプロジェクタパラメータにおいては，カメラパラメータ同様，ワールド座標中の対応点における特徴点  $(X_w, Y_w, Z_w)$  とシート光がその特徴点に投射されている時の角度  $(x_{pi}^n)$  と

の対応をとればよい．その様子を図[7] (b) に示す．ここで，三次元計測時にシート光を走査させることから，対応点検出の際もシート光を走査させ，ワールド座標中の特徴点を投射している角度を算出する必要がある．そこで，シート光を走査させ，撮像した二次元画像中のマーキングポイントの有意画素中を通ったシート光の角度の重心をとる．そうすることにより，走査時のセンサボードからプロジェクタへの角度指令の際に使われる DA コンバータの DA 変換パラメータのキャリブレーションを行う．以上により，サブピクセル精度での対応点検出が可能となる．

次に，すべてのキャリブレーションパラメータを算出したあとにそれらを元に三次元演算を行う過程について述べる．この時点でキャリブレーションパラメータは既知の情報となっており，

入力パラメータとして二次元画像におけるアドレス  $(u_i^n, v_i^n)$  ，投射光の投射角度

$x_{pi}^n$  である．求めたキャリブレーションパラメータと測定パラメータを用いて三次元演算を行う．式[11][12][14]を展開すると，

$$\begin{aligned}
(C_{11}^n - C_{31}^n u_i^n) x_{wi} + (C_{12}^n - C_{32}^n u_i^n) y_{wi} + (C_{13}^n - C_{33}^n u_i^n) z_{wi} &= C_{34}^n u_i^n - C_{14}^n \\
(C_{21}^n - C_{31}^n v_i^n) x_{wi} + (C_{22}^n - C_{32}^n v_i^n) y_{wi} + (C_{23}^n - C_{33}^n v_i^n) z_{wi} &= C_{34}^n v_i^n - C_{24}^n \quad [24] \\
(P_{11}^n - P_{21}^n x_{pi}^n) x_{wi} + (P_{12}^n - P_{22}^n x_{pi}^n) y_{wi} + (P_{13}^n - P_{23}^n x_{pi}^n) z_{wi} &= P_{24}^n x_{pi}^n - P_{14}^n
\end{aligned}$$

となる．ここで，

$$F = \begin{pmatrix} C_{34}^n u_i^n - C_{14}^n \\ C_{34}^n v_i^n - C_{24}^n \\ P_{24}^n x_{pi}^n - P_{14}^n \end{pmatrix} \quad [25]$$

$$Q = \begin{pmatrix} (C_{11}^n - C_{31}^n u_i^n) x_{wi} & (C_{12}^n - C_{32}^n u_i^n) y_{wi} & (C_{13}^n - C_{33}^n u_i^n) z_{wi} \\ (C_{21}^n - C_{31}^n v_i^n) x_{wi} & (C_{22}^n - C_{32}^n v_i^n) y_{wi} & (C_{23}^n - C_{33}^n v_i^n) z_{wi} \\ (P_{11}^n - P_{21}^n x_{pi}^n) x_{wi} & (P_{12}^n - P_{22}^n x_{pi}^n) y_{wi} & (P_{13}^n - P_{23}^n x_{pi}^n) z_{wi} \end{pmatrix} \quad [26]$$

$$v = \begin{pmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ z_{wi} \end{pmatrix} \quad [27]$$

と定義すると，

$$F = Q \cdot V \quad [28]$$

となる．よって，測定によって得られた点のシート光のイメージセンサ上でのアドレスと投射光の角度と求められたキャリブレーションパラメータから

$$V = Q^{-1} \cdot F \quad [29]$$

と三次元演算することができる．

シート光走査によって得られたアドレス，投射光角度情報からすべての点において上記の演算を行うことによって三次元映像を取得することが可能となる．

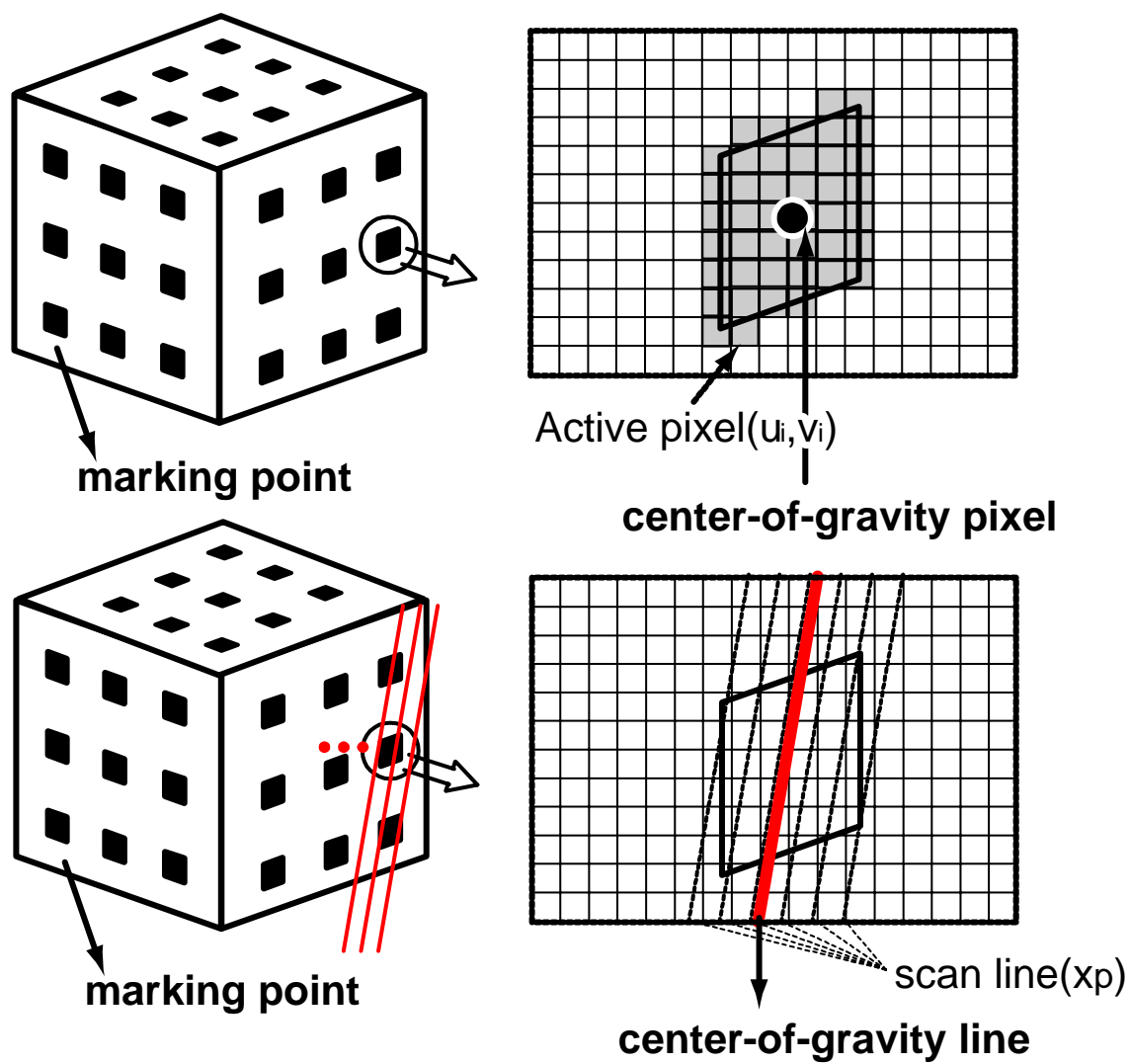


図 7 : 対応点検出法

(a) カメラにおける対応点検出 (b) プロジェクタにおける対応点検出

### 3. 高速三次元計測システムの提案

ここでは、前章までに示した三次元センサ、さらには高精度な三次元演算のためのキャリブレーションを踏まえて、問題となる三次元演算モジュールについて述べる。これにより、高速に三次元演算を行うことができる。

#### 3.1. 三次元計測システムの概要

これまでの三次元計測システム[14][15]におけるボトルネックはデータの転送速度と演算部分によるものが大きい。センサ技術の発展により、高速にデータを取得することが容易になってきた今、三次元システムにおける今後の課題はデータ処理部分に存在することは容易に想像できる。これまで、われわれが提案してきた三次元システムの図を図[8]、ブロック図を図[9]に示す。現段階でのボトルネックはデータの転送速度である。高精細に三次元データを取得しようとした場合、より高解像度で三次元データを取得しようとした場合には、三次元演算のためのデータが膨大になることによるボトルネックがより深刻になる。また、複数方向からの三次元計測による任意視点三次元システムに展開するといった場合には、不可能に近い。そこで、今回われわれは図[10]に示すようにオンボードによる三次元計測システムを提案する。そのブロック図を図[11]に示す。これにより、高まるデータ転送速度への要求が大きくなることによる問題が解決することができる。三次元センサを搭載した三次元計測ボードを用いて、光切断法に必要な輝点のアドレス情報を取得する。これまでのシステムである図[8]ではこのあとデータは Fast - SCSI を通して PC に転送される。現状での三次元演算によるボトルネックはこの転送速度に存在する。ボトルネック解消のための手法として単にデータ線の規格を高速なものを用いることが考えられるが、これまで述べてきたように高解像度化などによって必要とされる転送速度は大きくなることは間違いないことから、今回は図[10]に示したように、三次元計測用のコントローラを搭載した FPGA ボードを使用し解決する。図[10]に三次元計測用のコントローラの詳細なブロック図を示す。コントローラ内には三次元演算のための演算部、三次元センサボード用のコントローラ、液晶にデータを表示する液晶モニターコントローラで構成される。以下ではこれら、それぞれの機能について述べる。

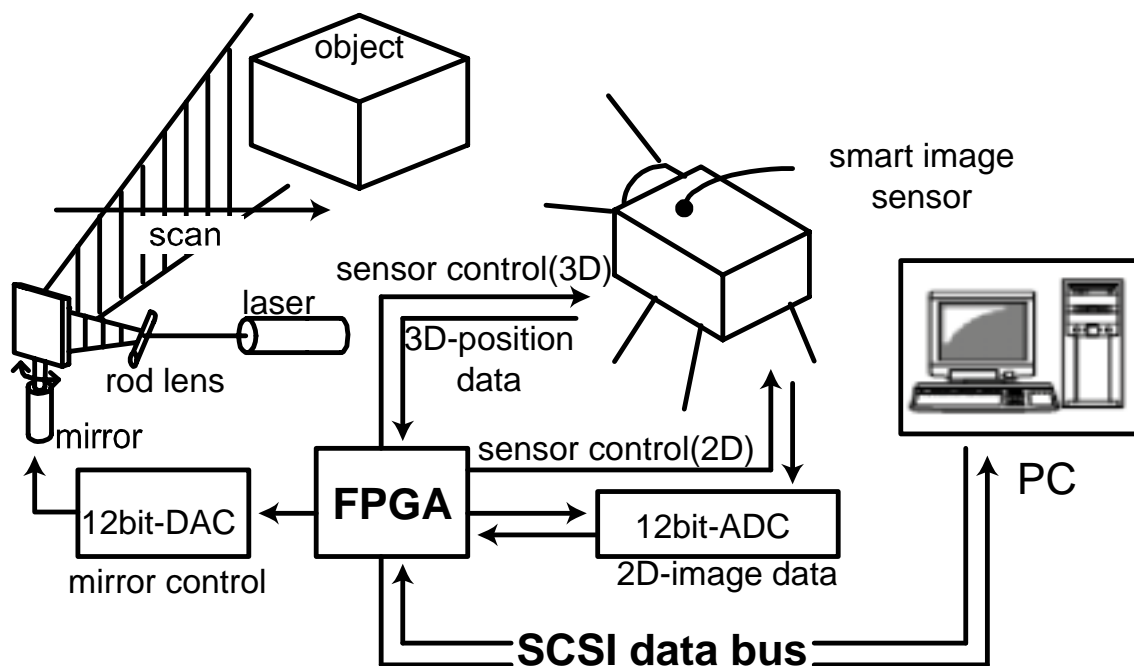


図 8：従来の三次元計測システムの概念図

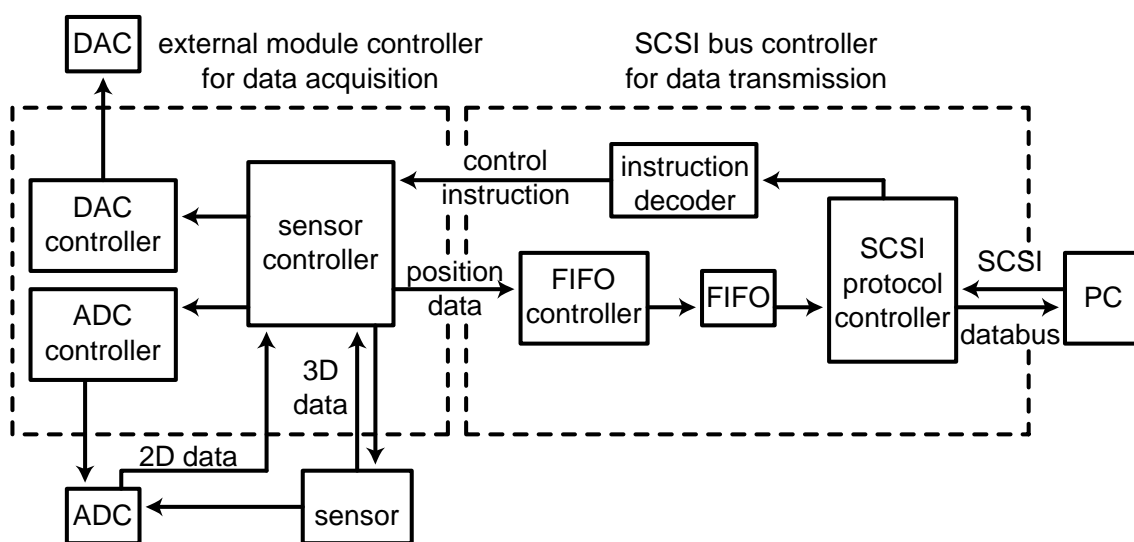


図 9：従来の三次元計測モジュールのブロック図

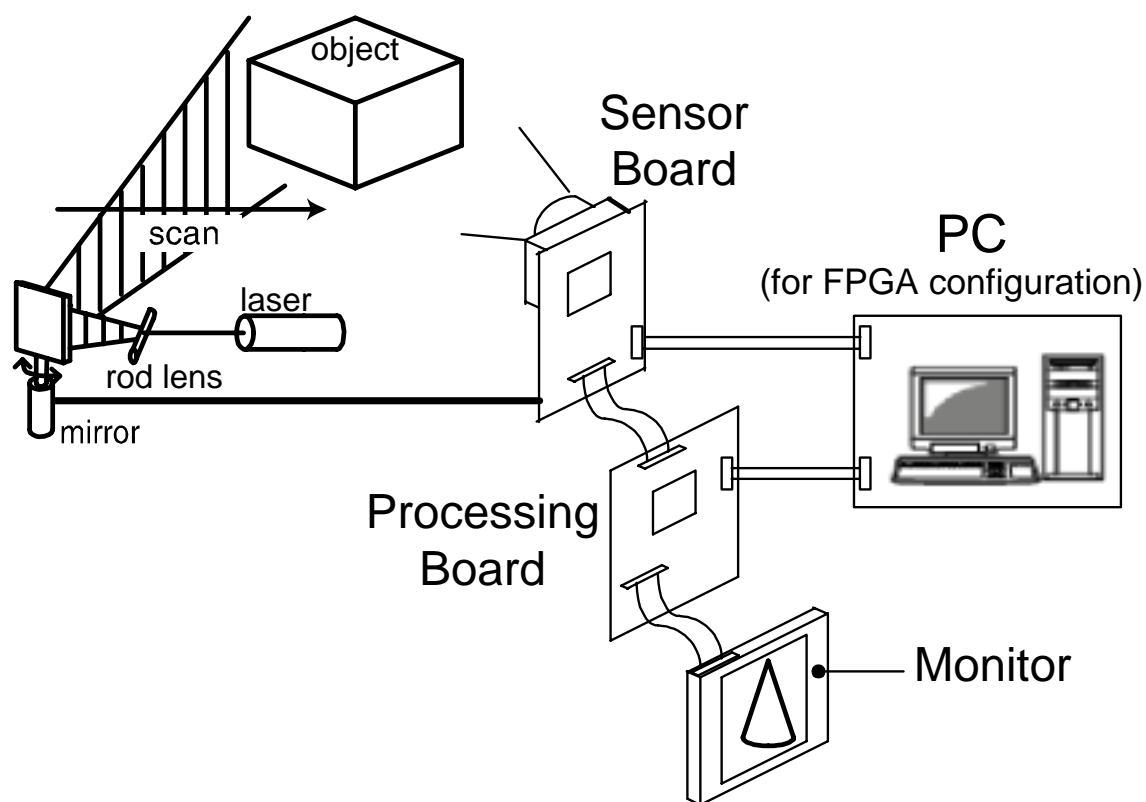


図 10：提案する三次元計測システムの概念図

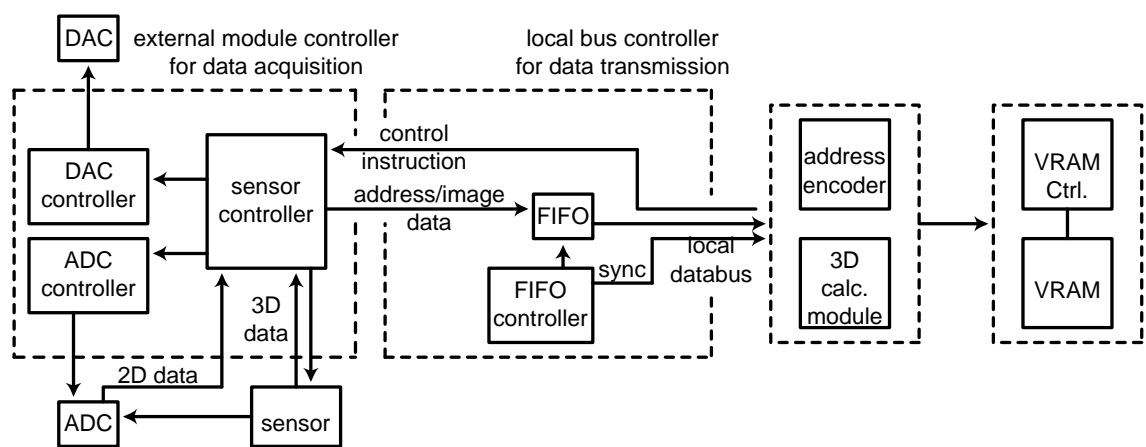


図 11：提案する三次元計測システムのブロック図

## 3.2. 三次元演算モジュール

ここでは三次元演算モジュール部について述べる．これまで，投射した光の輝点をセンサ内部において取得し，輝点のアドレスデータを PC に転送し，投射角度を用いることで三次元演算を行っていた．その際，第 2 章にて述べたキャリブレーションパラメータを使用し，式[29]により三次元演算を行う．今回の目的である，オンボード FPGA に搭載された三次元演算モジュール部を利用した三次元演算を行うわけではあるが，FPGA では PC とは違い，逆行列を求める演算など，複雑な三次元演算を行うことは容易ではない．そこで，今回はハードウェアオリエンテッドな設計を行うため，式[29]を用いて三次元データを演算することで FPGA への実装を行う．

ここでは三次元演算を行う上でのキャリブレーションパラメータは既知のとして扱う．そもそも，キャリブレーションパラメータ取得した後に式[29]を用いて三次元演算を行うが，式[29]そのまま用いて FPGA で行うことは難しい．そこで，今回は式[29]を以下のように  $X, Y, Z$  について展開する．

$$\begin{aligned}
X = & [\{P_{12}(C_{14}C_{23} - C_{13}C_{24}) + P_{13}(C_{12}C_{24} - C_{14}C_{22}) + P_{14}(C_{13}C_{22} - C_{12}C_{23})\} \\
& + \{P_{12}(C_{33}C_{24} - C_{23}C_{34}) + P_{13}(C_{22}C_{34} - C_{24}C_{32}) + P_{14}(C_{23}C_{32} - C_{22}C_{33})\}u \\
& + \{P_{12}(C_{13}C_{34} - C_{14}C_{33}) + P_{13}(C_{14}C_{32} - C_{12}C_{34}) + P_{14}(C_{12}C_{33} - C_{13}C_{32})\}v \\
& + \{P_{22}(C_{13}C_{24} - C_{14}C_{23}) + P_{23}(C_{14}C_{22} - C_{12}C_{24}) + P_{24}(C_{12}C_{23} - C_{13}C_{22})\}x_p \\
& + \{P_{22}(C_{14}C_{33} - C_{13}C_{34}) + P_{23}(C_{12}C_{34} - C_{14}C_{32}) + P_{24}(C_{13}C_{32} - C_{12}C_{33})\}vx_p \\
& + \{P_{22}(C_{23}C_{34} - C_{24}C_{33}) + P_{23}(C_{24}C_{32} - C_{22}C_{34}) + P_{24}(C_{33}C_{22} - C_{32}C_{23})\}ux_p ] \\
& /|Q|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Y = & [\{P_{11}(C_{13}C_{24} - C_{14}C_{23}) + P_{13}(C_{14}C_{21} - C_{11}C_{24}) + P_{14}(C_{11}C_{23} - C_{13}C_{21})\} \\
& + \{P_{11}(C_{23}C_{34} - C_{24}C_{33}) + P_{13}(C_{24}C_{31} - C_{21}C_{34}) + P_{14}(C_{33}C_{21} - C_{31}C_{23})\}u \\
& + \{P_{11}(C_{14}C_{33} - C_{13}C_{34}) + P_{13}(C_{11}C_{34} - C_{14}C_{31}) + P_{14}(C_{13}C_{31} - C_{11}C_{33})\}v \\
& + \{P_{21}(C_{14}C_{23} - C_{13}C_{24}) + P_{23}(C_{11}C_{24} - C_{14}C_{21}) + P_{24}(C_{13}C_{21} - C_{11}C_{23})\}x_p \\
& + \{P_{21}(C_{13}C_{34} - C_{14}C_{33}) + P_{23}(C_{14}C_{31} - C_{11}C_{34}) + P_{24}(C_{11}C_{33} - C_{31}C_{13})\}vx_p \\
& + \{P_{21}(C_{24}C_{33} - C_{23}C_{34}) + P_{23}(C_{21}C_{34} - C_{24}C_{31}) + P_{24}(C_{31}C_{23} - C_{33}C_{21})\}ux_p ] \\
& /|Q|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z = & [\{P_{11}(C_{14}C_{22} - C_{12}C_{24}) + P_{12}(C_{11}C_{24} - C_{14}C_{21}) + P_{14}(C_{12}C_{21} - C_{11}C_{22})\} \\
& + \{P_{11}(C_{24}C_{32} - C_{22}C_{34}) + P_{12}(C_{21}C_{34} - C_{24}C_{31}) + P_{14}(C_{22}C_{31} - C_{21}C_{32})\}u \\
& + \{P_{11}(C_{12}C_{34} - C_{14}C_{32}) + P_{12}(C_{14}C_{31} - C_{11}C_{34}) + P_{14}(C_{11}C_{32} - C_{12}C_{31})\}v \\
& + \{P_{21}(C_{12}C_{24} - C_{14}C_{22}) + P_{22}(C_{14}C_{21} - C_{11}C_{24}) + P_{24}(C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21})\}x_p \\
& + \{P_{21}(C_{14}C_{32} - C_{12}C_{34}) + P_{22}(C_{11}C_{34} - C_{14}C_{31}) + P_{24}(C_{12}C_{31} - C_{11}C_{32})\}vx_p \\
& + \{P_{21}(C_{22}C_{34} - C_{24}C_{32}) + P_{22}(C_{24}C_{31} - C_{21}C_{34}) + P_{24}(C_{21}C_{32} - C_{22}C_{31})\}ux_p ] \\
& /|Q|
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
|Q| = & \{P_{11}(C_{12}C_{23} - C_{13}C_{22}) + P_{12}(C_{13}C_{21} - C_{11}C_{23}) + P_{13}(C_{11}C_{22} - C_{12}C_{21})\} \\
& + \{P_{11}(C_{22}C_{33} - C_{23}C_{32}) + P_{12}(C_{23}C_{31} - C_{21}C_{33}) + P_{13}(C_{21}C_{32} - C_{22}C_{31})\}u \\
& + \{P_{11}(C_{13}C_{32} - C_{12}C_{33}) + P_{12}(C_{11}C_{33} - C_{13}C_{31}) + P_{13}(C_{12}C_{31} - C_{11}C_{32})\}v \\
& + \{P_{21}(C_{13}C_{22} - C_{12}C_{23}) + P_{22}(C_{11}C_{23} - C_{13}C_{21}) + P_{23}(C_{12}C_{21} - C_{11}C_{22})\}x_p \\
& + \{P_{21}(C_{12}C_{33} - C_{13}C_{32}) + P_{22}(C_{13}C_{31} - C_{11}C_{33}) + P_{23}(C_{11}C_{32} - C_{12}C_{31})\}vx_p \\
& + \{P_{21}(C_{23}C_{32} - C_{22}C_{33}) + P_{22}(C_{21}C_{33} - C_{31}C_{23}) + P_{23}(C_{22}C_{31} - C_{21}C_{32})\}ux_p [30]
\end{aligned}$$

ここで，各変数( $u, v, x_p$ )以外は定数として扱うことが可能であることから，上式

を新たに定数項

$$(A_{x,y,z}, B_{x,y,z}, C_{x,y,z}, D_{x,y,z}, E_{x,y,z}, F_{x,y,z}, a_{x,y,z}, b_{x,y,z}, c_{x,y,z}, d_{x,y,z}, e_{x,y,z}, f_{x,y,z},)$$

を用いることによって，以下のように展開することが可能である．

$$\begin{aligned} X &= \frac{X'}{|Q|} = \frac{A_x + B_x u + C_x v + D_x x_p + E_x v x_p + F_x u x_p}{a_x + b_x u + c_x v + d_x x_p + e_x v x_p + f_x u x_p} \\ Y &= \frac{Y'}{|Q|} = \frac{A_y + B_y u + C_y v + D_y x_p + E_y v x_p + F_y u x_p}{a_y + b_y u + c_y v + d_y x_p + e_y v x_p + f_y u x_p} \\ Z &= \frac{Z'}{|Q|} = \frac{A_z + B_z u + C_z v + D_z x_p + E_z v x_p + F_z u x_p}{a_z + b_z u + c_z v + d_z x_p + e_z v x_p + f_z u x_p} [31] \end{aligned}$$

以上により，複雑な行列演算を行うことなく演算することが可能となる．

実際に実装する際の様子を図[12]に示す．図[12]に示したように，パラメータ

$$(A_{x,y,z}, B_{x,y,z}, C_{x,y,z}, D_{x,y,z}, E_{x,y,z}, F_{x,y,z}, a_{x,y,z}, b_{x,y,z}, c_{x,y,z}, d_{x,y,z}, e_{x,y,z}, f_{x,y,z},)$$

保持しておいて，センサからのアドレス情報，レーザーソースによる投射光角度情報を入力としてパイプライン的（図[13]参照）に演算することができる．演算の結果求めた座標は，回転処理をすることによって任意に視点を変更できる．この際に三角関数の演算を行う必要があり，codic 法や sin テーブルを保持する方法などがあるが，今回は多項式による近似を用いた．図[14]が近似による誤差の評価である．実際の  $\sin(\quad)$  関数に対して，平均誤差は 0.31% で標準偏差は 1.07% であった．

これら三次元座標  $(X, Y, Z)$  はそれぞれ独立に演算することが可能であるので，ハードウェアによる並列演算を行うことができ，高速化が望める．

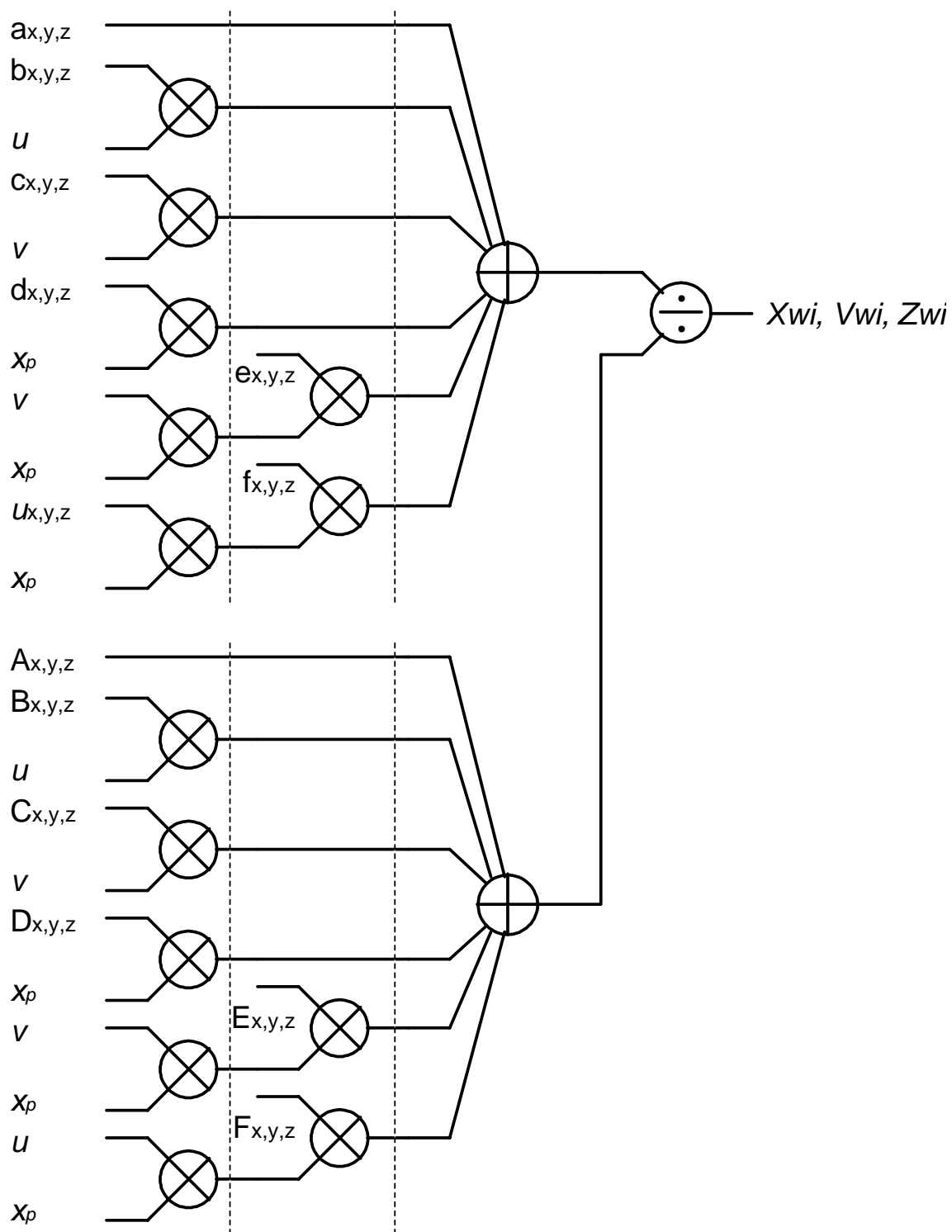


図 12：三次元演算モジュールのブロック図

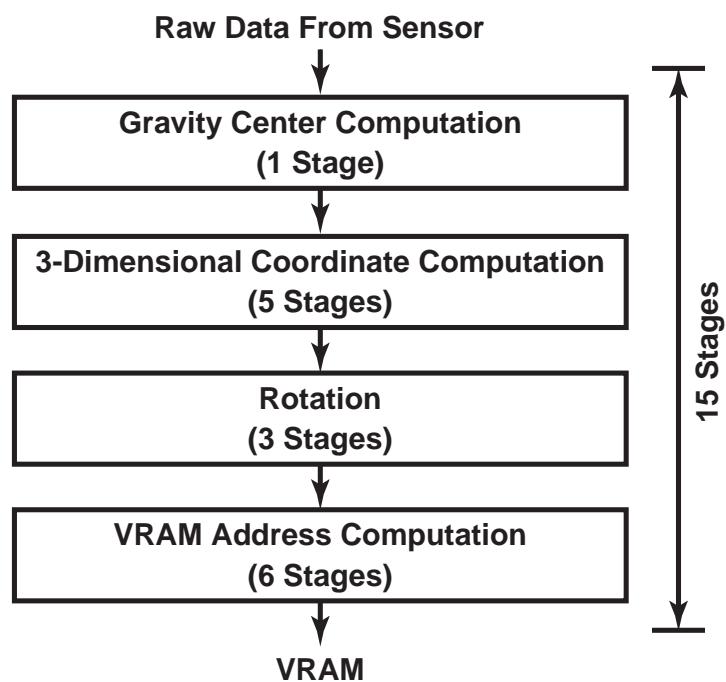


図 13：三次元演算ブロックのパイプライン構成

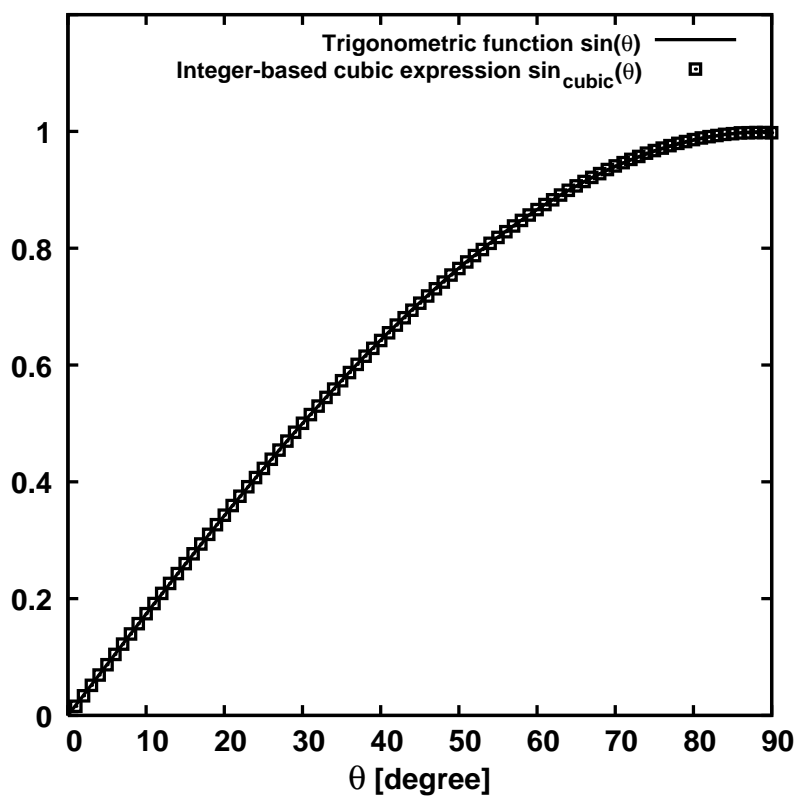


図 14： $\sin$  の多項式近似による誤差評価

### 3.3. グラフィックコントローラ

PC を用いずにオンボードでのスタンドアローン処理を行うにあたり，その結果を出力するための画像表示回路を実装した．モジュール構成を図[15]に示す．モニタへの同期信号を生成するビデオタイミングジェネレータ，描画データを保持する VRAM 及びそのコントローラ，ピクセルデータを VGA 規格のアナログ信号へと変換する DAC のコントローラからなる．

描画動作の概念を図[16]に示す．描画領域は仮想画面空間及びそれに内包される形での実画面空間からなり，ビデオタイミング信号は実画面空間だけを描画するように動作する．制御信号のタイミングは図[17]，図[18]のようになっており，走査線が実画面空間の最終列まで描画し終わるとブランキング信号  $nBlk$  を low にセットし，水平同期信号  $Hsync$  をドライブする．この信号により走査線は画面空間の先頭列へと復帰し，ブランキング信号が High になっている期間，実画面が描画される．同様に，垂直同期信号  $Vsync$  は縦の解像度分だけ水平同期が繰り返し行われ，実画面空間の最終行を描画し終わるとブランキング期間中にドライブされ，走査線を画面空間の先頭行へと復帰させる．この一連の動作により 1 フレームが描画される，各信号のタイミングにより解像度，リフレッシュレートが決定される．本研究では，使用したセンサモジュールに合わせ  $640 \times 480$ (VGA)の解像度を実現するようビデオタイミングジェネレータを動作させた．

VRAM コントローラはセンサから出力される二次元画像データ，検出した反射光のアドレスデータ及びそれから計算される三次元データの VRAM への書き込みを行う．またビデオタイミングと同期して読み出し，描画データとして D/A コンバータへと渡す．VRAM への書き込みはフレームの更新レートが高く（三次元モードの場合数  $kfps$ ）1 プレーンを全て描くのではなく算出された座標点のみを書き込み，座標書き込み間の idle ステートを利用して VRAM 内を先頭アドレスから順次スweepしてクリアする仕様とした．

アナログビデオ信号生成用の D/A コンバータは 2 線の I2C バスを通して所要の仕様を満たすモードでの動作を行うようコンフィギュレーションを行っている（図 19）．

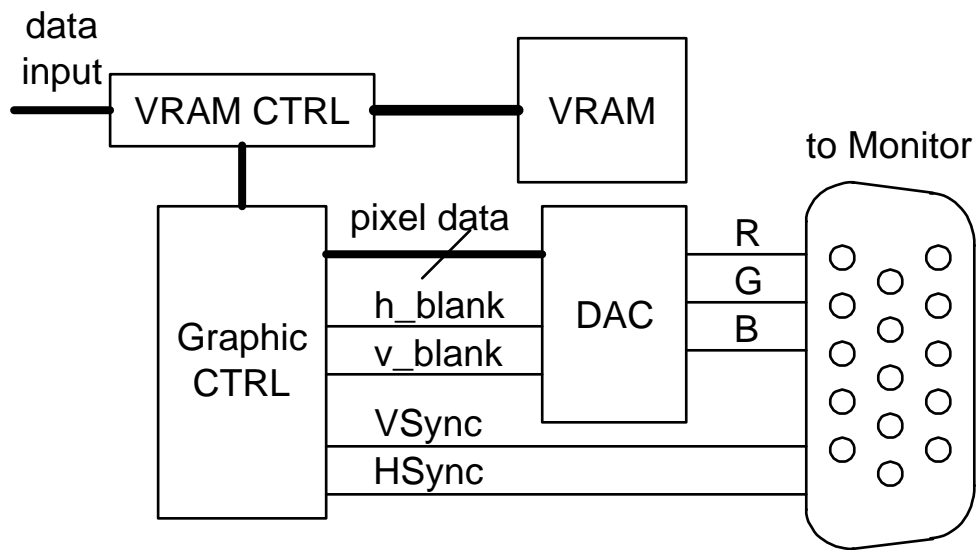


図 15 : VGA のグラフィックコントローラのブロック図

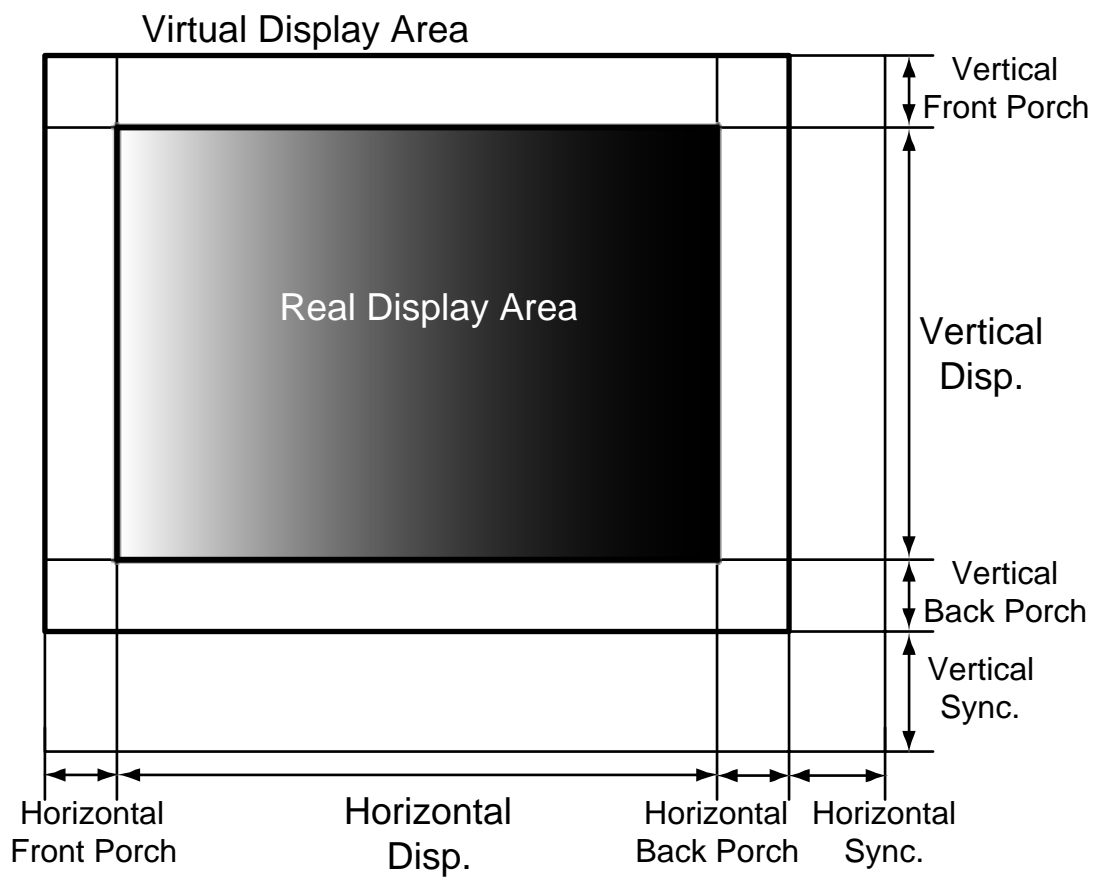


図 16 : VGA のグラフィックコントローラの描画概念図

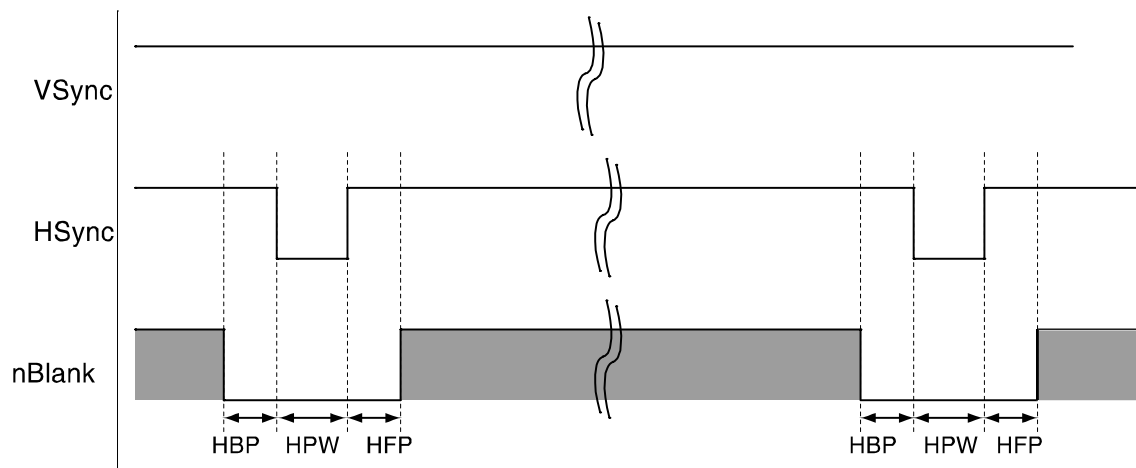


図 17：水平同期のタイミングチャート

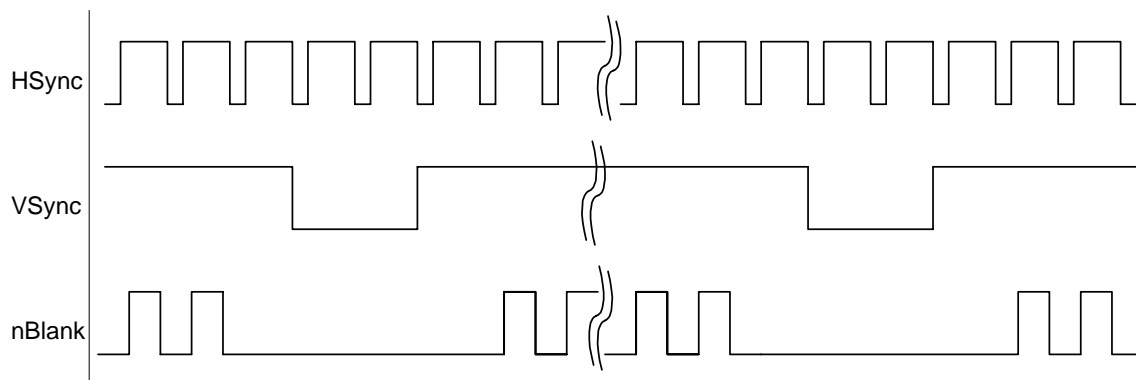


図 18：垂直同期のタイミングチャート

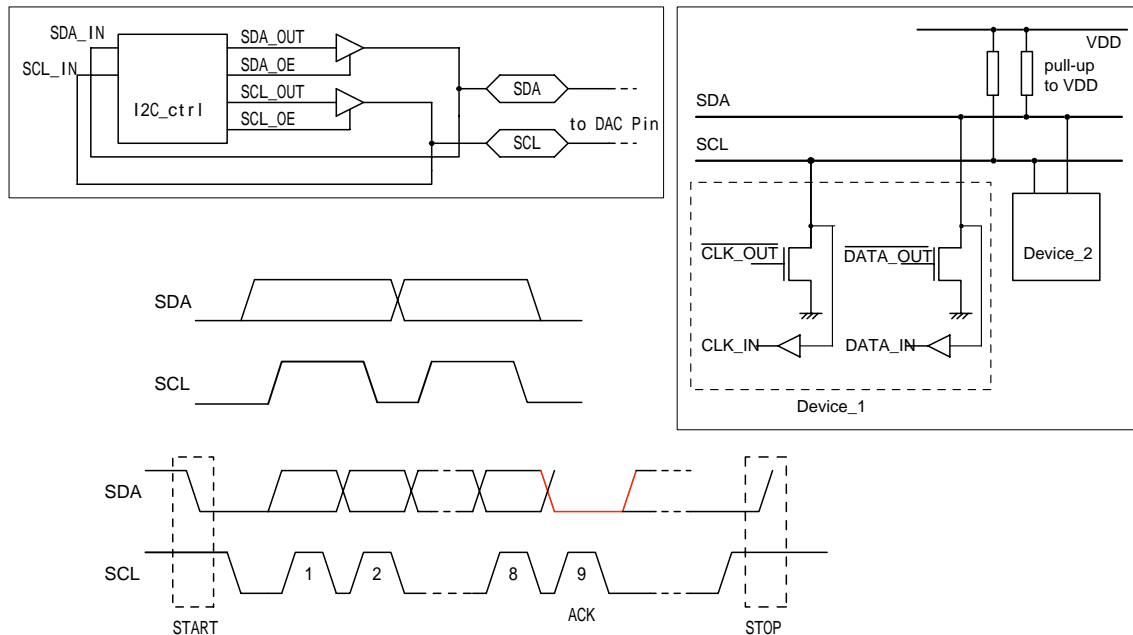


図 19：I2C コントローラのブロック構成及びタイミング図

### 3.4. データ転送バス

センサボードとデータ処理 FPGA 間のデータ転送のためのバスとして図[20]に示すようなローカルバスを実装した。センサモジュール側では FIFO 及びそのコントローラを持っており、センサの出力するデータは一旦 FIFO へと書き込まれ、Sync 信号と合わせて順次読み出し、送信される。データ処理 FPGA 側では Sync 信号を同期信号としてデータ線のデータをラッチする。

図[21]にバスの信号線の動作タイミングチャートを示す。センサボードとデータ処理 FPGA ボードはともに動作周波数は同じ 40MHz ながら、独立のクロック (clk1, clk2) で動作しており、Sync 信号により同期を取りデータ転送を行う。Sync 信号が 2clk 間 High であることを検出した場合データ線のデータをラッチする仕様となっている。実際にセンサからのデータを送る際には 2D モード、3D モードの場合それぞれ図[22]、図[23]のようにデータが流れる。

バスはより高解像度のセンサの使用や、複数のセンサからのデータ転送などの要求が出てきた場合にも、容易にバス幅を拡張でき、また将来的にセンサとプロセスユニットの ASIC での 1 チップ化を考える際にもそのままバスワイヤとして置き換えることが出来るよう設計した。

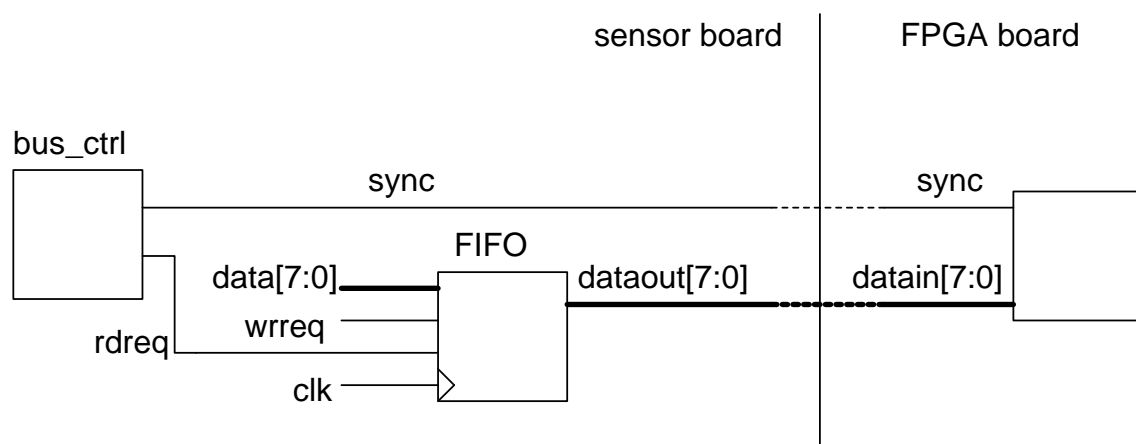


図 20 : バスのブロック図

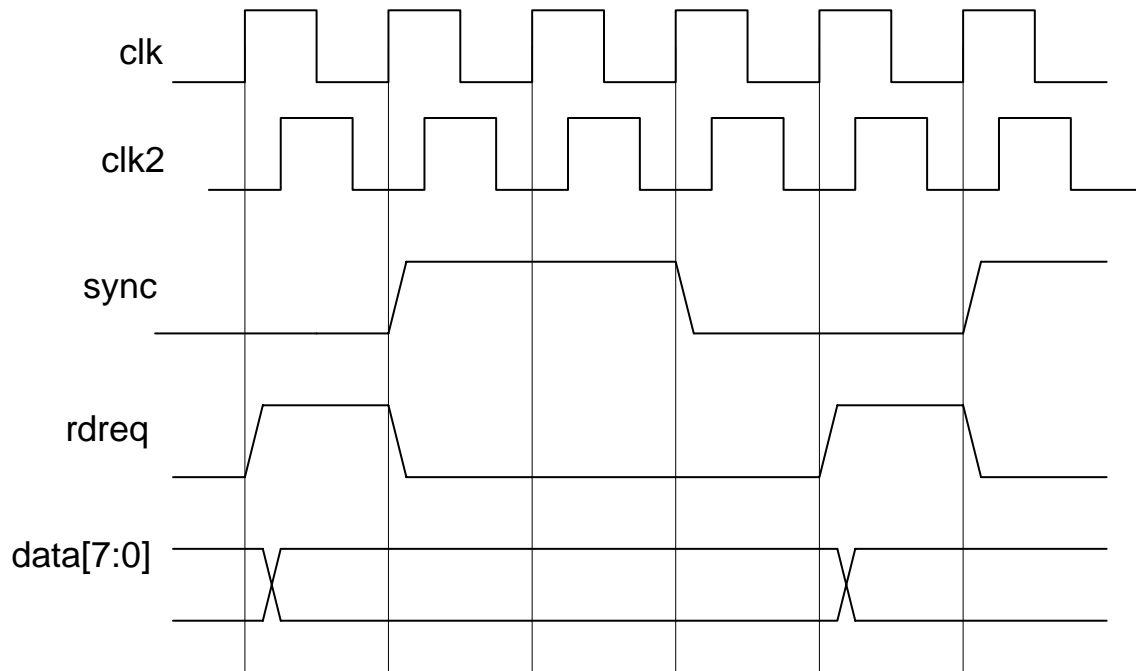


図 21 : バスの動作タイミング図

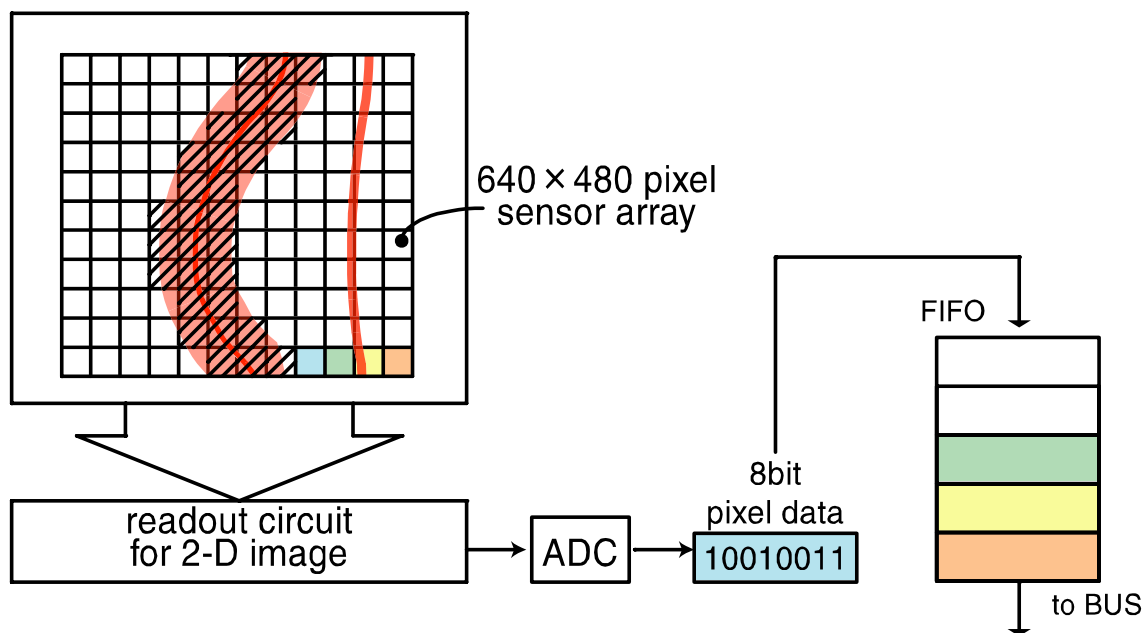


図 22 : 2D モードでのデータ転送の様子

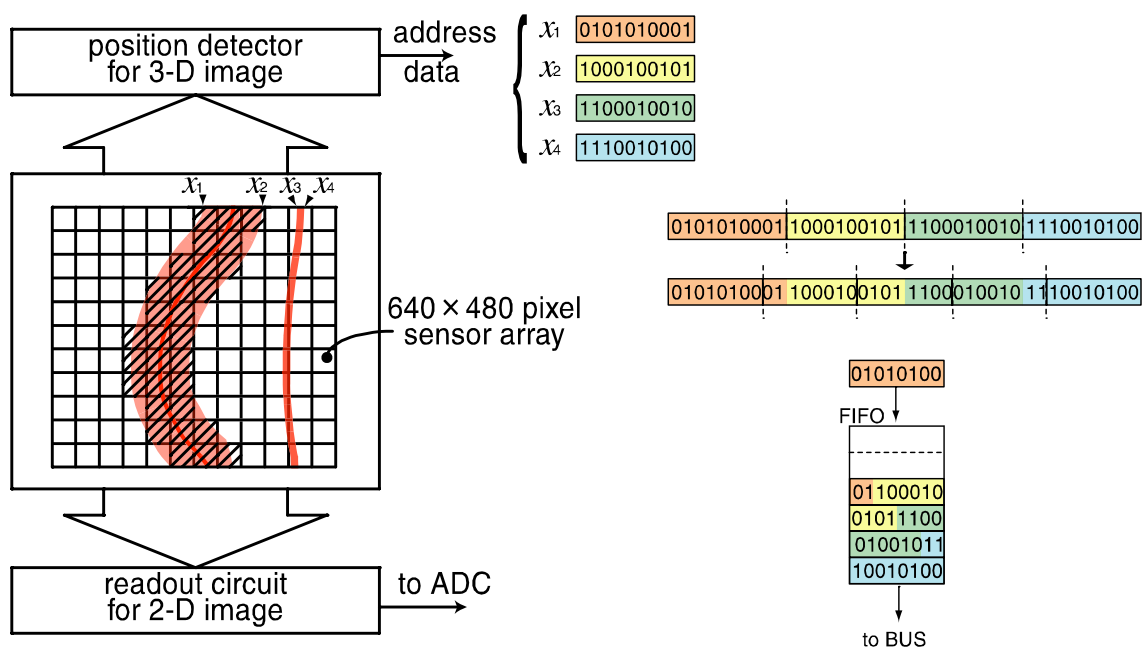


図 23 : 3D モードでのデータ転送の様子

使用デバイス	Altera 社 StratixII EP2S130
使用リソース	
ALUT(Adaptive Look Up Table)数( 1)	19,778 / 106,032 (18 %)
等価 LE(Logic Element)数	24,723
メモリビット数	2.3Mb
DSP ブロック数( 2)	224 / 504 (44 %)

備考

( 1)ALUT はロジック機能の最小単位

( 2)1 ブロックは 9bit の DSP ユニット

## 4. 高速三次元計測の実験

### 4.1. 測定システム

図[24]に今回構築した高速三次元計測システムを示す．図中イメージセンサボード内に高速に輝点を検出可能なスマートイメージセンサを搭載している．センサボードにはセンサ自体をコントロールするセンサコントローラが組み込まれている．センサボード内にはミラーコントローラも内蔵されており，それに基づいてミラーは動作する．センサにて取得した輝点検出結果は三次元演算コントローラを搭載したボードに送信される．ボード間は 8bit のバスにて繋がれている．三次元演算コントローラによる三次元計測結果は図中の液晶モニタに表示される．

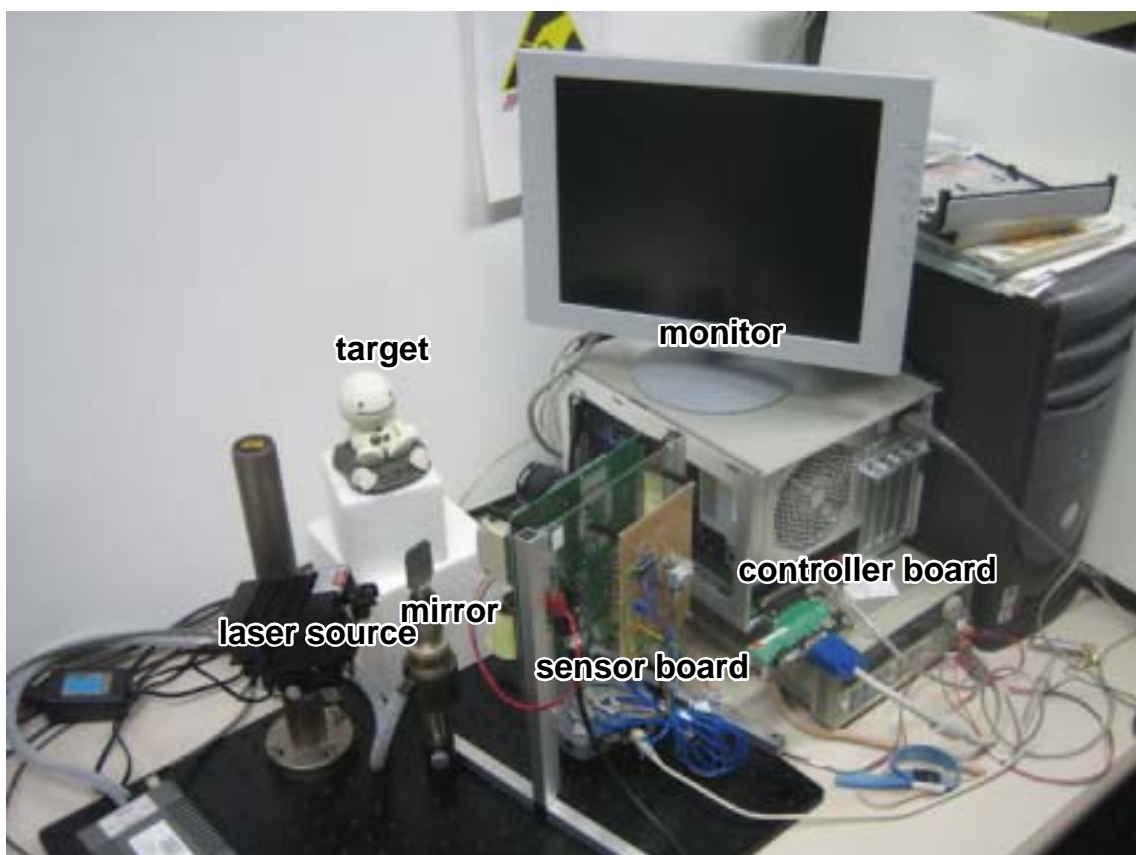


図 24：三次元計測システムの写真

## 4.2. 三次元演算モジュールのシミュレーション

ここではセンサコントローラボードにおける三次元演算の際の三次元演算部分のシミュレーションを行う。シミュレーション環境の構築として、事前に求めたキャリブレーションパラメータを用いて、PC を利用し取得したレンジデータのシート光のアドレスデータを使用する。取得したアドレスデータを作成した三次元演算モジュールに入力し、その出力結果ともとの三次元データとの比較を行う。図[25]に事前に測定した対象の図を示す。図[26]にもともと PC による三次元計測結果と三次元演算モジュールを利用した三次元情報を載せる。FPGA にて演算された三次元計測結果は式[33]に基づくものである。演算の際の桁落ち、 $\tan$  部の線形化による多少の精度劣化は見られるものの、三次元計測データ範囲からみても小さいといえる。

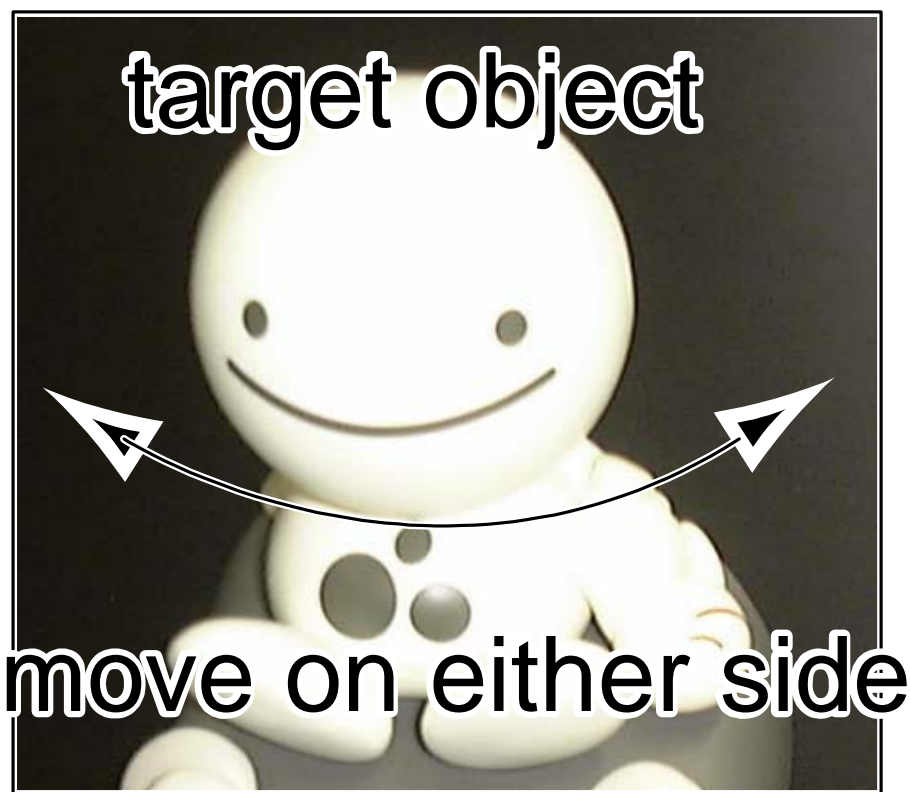


図 25：測定対象

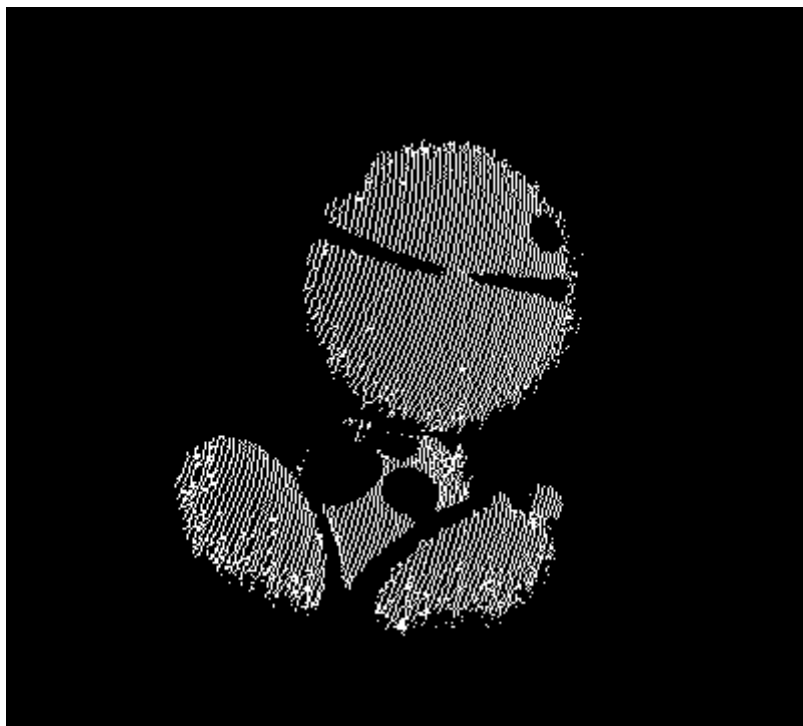


図 26 : PC/ソフトウェア処理によるデータ

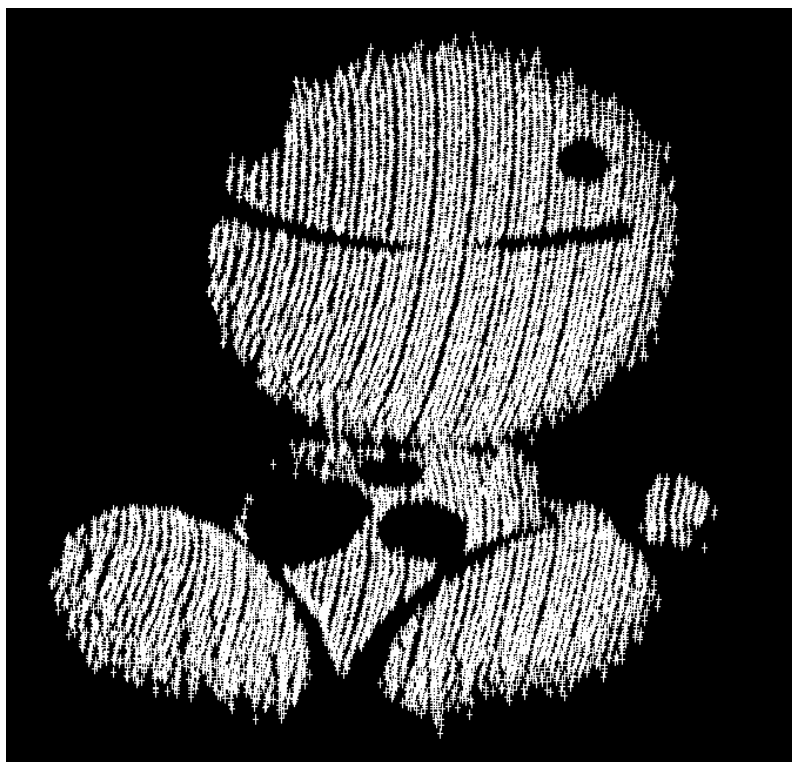


図 27 : シミュレーション結果

### 4.3. 二次元画像の取得と表示

まず，はじめに二次元計測結果を図[27]に示す．解像度 1024x768(XGA)pixel の液晶ディスプレイの中心 640x480 画素に二次元データを表示してある．センサからは 1 画素 8bit の輝度値が出力され，コントローラボードにて取得する．輝度値は 8bit のグレースケールでグラフィックコントローラを通すことによってモニターに表示している．図[26]はレーザーポインタを直接レンズに当てている様子であり，レーザポインタが当たっている部分は輝度が高いことがわかる．



図 28：二次元計測結果によるディスプレイ表示の様子

## 4.4.輝度検出結果と表示

二次元計測結果を表示した図[28]と同様，レーザーポインタをレンズに直接投射した場合の結果を図[29]に示す．出力結果では投射したレーザーポインタ部分の輝度のエッジが出力してある．第二章にて説明したセンサの特性により各行において閾値を越えた輝度値を持つ画素のアドレスを 10bit のデータとしてコントローラ部で取得する．その結果をグラフィックコントローラを通してモニタに表示している．

図 29：光投射による輝度部のエッジ検出結果

図[30]は実際に三次元計測を行うときに使用するシート光を対象物体に投射し、その反射光のエッジを検出している様子である。写真左側に見える対象物体に当たったシート光に対応したエッジが写真右側のモニタ上に検出結果として表示されているのが分かる。

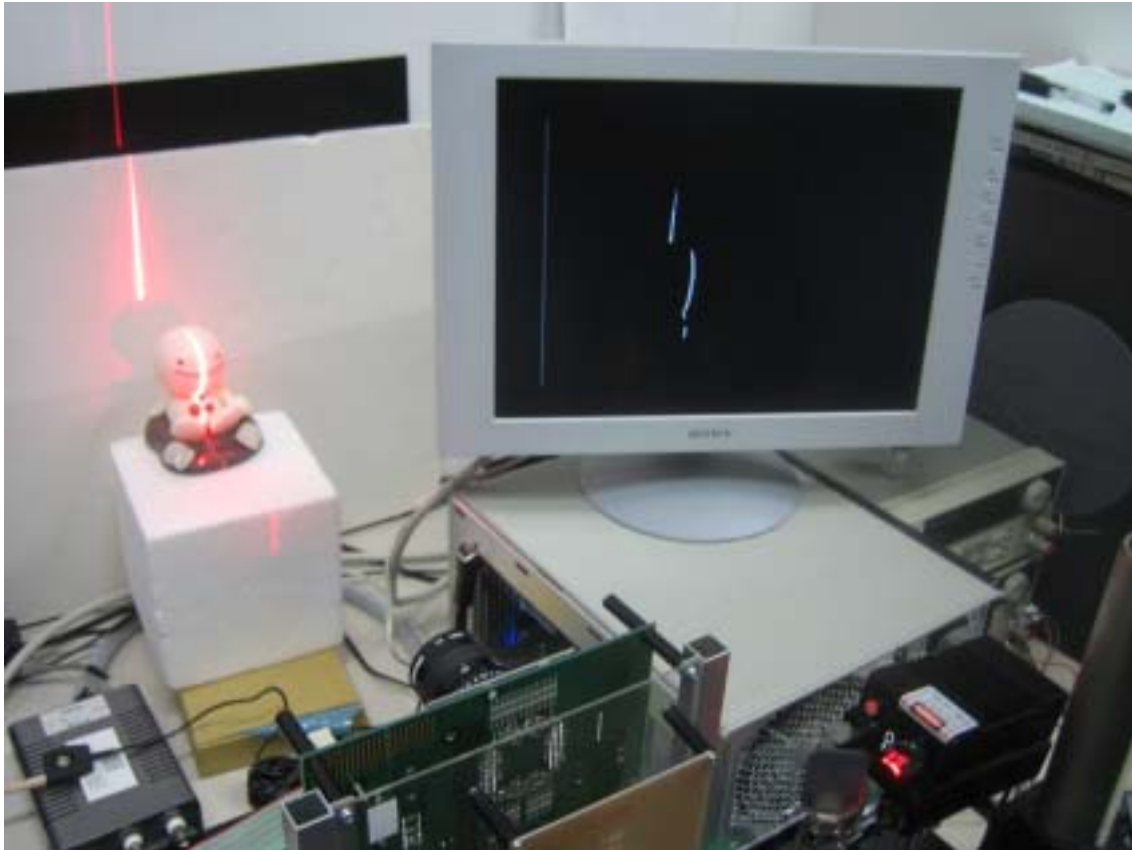


図 30：シート光投射による反射光のエッジ検出の様子

## 4.5. 三次元計測データによる三次元演算結果と表示

本節では、第3章で述べた高速三次元計測システムに基づき4.3, 4.4節を踏まえ、実際に取得した投射光のアドレスを元に三次元演算モジュールを用いた三次元計測を行う。前節までに述べたように取得したアドレスデータは三次元モジュールに入力され、パイプライン的に加算、乗算、除算を通してグラフィックコントローラ内のVRAMに書き込まれる。それを随時液晶モニタに書き込む。測定環境としては図[24]に示したものであり、今回は投射光の減衰による三次元計測時間の劣化を防ぐため、測定距離は200mmとしている。まずは、コントローラの三次元計測速度についての見積もりを行う。

図[31]に三次元演算を用いた三次元計測結果を示す。図[31]に示した結果は測定範囲原点を中心に400mm四方の空間にて検出された三次元位置をz方向に黒から白までの色で表現しており、リアルタイムで輝度検出、データ転送、三次元演算、三次元演算結果の表示の一連がなされている。奥行き情報を輝点の明度で表しており、その結果から三次元計測演算による三次元情報が取得できていることがわかる。

現状の測定速度は見積もりとは違い、20.0rangemap/secである。これは、センサ側における投射光つまり、シート光一本の蓄積時間に約400[us]の時間がかかっていることによる。つまり、今回の三次元計測結果のボトルネックはセンサ側の感度特性によるものといえる。センサが理想的にデータを取得すると過程した場合の三次元演算速度は125rangemap/sec(1rangemapあたり100本のシート光を撮像する場合)であり、システムレベルではとても高速な三次元計測コントローラといえる。



図 31：三次元計測結果

## 5. 結論

本研究では、今後ますます普及するであろう三次元映像技術における高速三次元計測システムの構築に注目し、その実現を行った。三次元計測の際に問題となるデータ転送、三次元演算、表示の一連の流れを高速に処理する三次元計測コントローラを作成した。三次元計測は光切断法に基づいたものであり、投射した光の入射アドレスのデータを 8bit のデータバスでセンサボードとつなぎ、そのデータを幾何学構造的なキャリブレーションに基づいた手法を応用し、ハードウェアオリエンテッドに展開した。実際に三次元演算部にキャリブレーションパラメータを用いて FPGA 内で測定することに成功した。また、グラフィックコントローラを作成し、演算された三次元演算結果をグレースケールにて液晶モニタに表示することに成功した。本論文内で見積もったように、作成した三次元計測コントローラの速度は現時点で使用しているスマートイメージセンサのスピードを超えており、高速な三次元計測コントローラを実現したといえる。現時点で実現した三次元計測コントローラの速度の限界は  $12.5\text{kframe/sec}$  であり、100 本のシート光撮像で 1 レンジマップを構成した場合、 $125\text{rangemap/s}$  と高速な三次元計測が可能である。

## 本研究に関する発表

新宅 宏彰, 大池 祐輔, 高山 伸一, 池田 誠, 浅田 邦博,  
``実時間三次元画像取得システム実現のための高速なセンサ制御・データ転送  
FPGA の設計と評価,``  
電子情報通信学会総合大会論文集, D-11-67, pp67, 2003 年 3 月 .

大池 祐輔, 新宅 宏彰, 池田 誠, 浅田 邦博,  
``スマートイメージセンサを用いた高精細・実時間三次元撮像システム,``  
映像情報メディア学会年次大会論文集, 20-9, pp. 299-300, 2003 年 8 月 .

Y. Oike, H. Shintaku, S. Takayama, M. Ikeda, and K. Asada,  
``Real-Time and High-Resolution 3-D Imaging System Using Light-Section  
Method and Smart CMOS Sensor,``  
in Proc. of IEEE International Conference on Sensors (IEEE SENSORS), pp.502  
- 507, Oct. 2003.

## 参考文献

[1]

D.M. Gavrilu, U. Franke, C. Wohler, and S. Gorzig,  
"Real-Time Vision for Intelligent Vehicles," IEEE Instrumentation &  
Measurement Magazine, Volume 4, Issue 2, June 2001 pp. 22 -- 27

[2]

O. Bimber,  
"Combining optical holograms with interactive computer graphics,"  
Computer, Volume 37, Issue 1, Jan. 2004, pp.85 -- 91

[3]

P. Render, P.J. Narayanan, T. Kanade,  
"Virtualized Reality:Constructing Virtual Worlds from Real Scenes,"  
in Proc. of IEEE Visualization '97, pp.277-283, Oct.1997

[4]

K. Wiesent, K. Barth, N. Navab P. Durlak, T. Brunner, O. Schuetz and W.  
Seissler,  
"Enhanced 3-D-Reconstruction Algorithm for C-Arm Systems Suitable for  
Interventional Procedures," Transaction on Medical Imaging, Vol. 19, No.5,  
pp. 391 -- 403, May. 2000.

[5]

S. Yoshimura, T. Sugiyama, K. Yonemoto, and K. Ueda,  
"A 48 k frame/s CMOS image sensor for real-time 3-D sensing and motion  
detection," in IEEE International Solid-State Circuits Conference Dig.  
Tech. Papers, 2001, pp. 94 -- 95.

[6]

T. Sugiyama, S. Yoshimura, R. Suzuki, and H. Sumi,  
"A 1/4-inch QVGA color imaging and 3-D sensing CMOS sensor with analog frame  
memory," in IEEE International Solid-State Circuits Conference Dig. Tech.  
Papers, 2002, pp. 434 -- 435.

[7]

Y. Oike, M. Ikeda, K. Asada,

"Design and Implementation of Real-Time 3-D Image Sensor With 640x480 Pixel Resolution," IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol.39, NO.4, pp.622 -- 628, Apr.2004

[8]

T. Nezuka, M. Hoshino, M. Ikeda and K. Asada,

"A Position Detection Sensor for 3-D Measurement," in Proc. of European Solid-State Circuits Conference, pp. 412 -- 415.

[9]

M. Kawakita and K. Iizuka,

"High-definition real-time depth-mapping TV camera: HDTV Axi-Vision Camera," OPTICS EXPRESS, No. 12, Vol. 12, pp.2781 -- 2794, June. 2004.

[10]

J. Costeria and T. Kanade,

"A Multi-body Factorization Method for Motion Analysis," in Proc. IEEE Fifth International Conference on Computer Vision, pp. 1071 -- 1076, 1995.

[11]

D. Scharstein and Richard Szeliski,

"High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light," in Proc. of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol.1 pp. 1-195 -- 1-202, Jun. 2003.

[12]

R. Hurukawa and H Kawasaki,

"Interactive Shape Acquisition using Marker Attached Laser Projector," in Proc. of the IEEE the Fourth International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, pp. 491 -- 498, Oct. 2003.

[13]

Y. Manabe, S. Kurosaka and K. Chihara,

"Simultaneous measurement of spectral distribution and shape," in Proc. of IEEE 15th International Conference on Pattern Recognition, Vol. 3, pp. 649 -- 806, Sep. 2000.

[14]

Y. Oike, H. Shintaku, S. Takayama, M. Ikeda, and K. Asada,  
"Real-Time and High-Resolution 3-D Imaging System Using Light-Section Method and Smart CMOS Sensor," in Proc. of IEEE International Conference on Sensors, pp.502 -- 507, Oct. 2003.

[15]

Y. Yachide, Y. Oike, M. Ikeda, and K. Asada,  
"Real-Time 3-D Measurement System Based on Light-Section Method Using Smart Image Sensor," in Proc. of IEEE International Conference on Image Processing, pp. 1008 -- 1011, Sep. 2005.

[16]

Roger Y. Tsai,  
"A Versatile Camera Calibration Technique for High-Accuracy 3D Machine Vision Metrology Using Off-the-shelf TV Cameras and Lenses," IEEE Journal of Robotics And Automation, Vol. RA-3, No.4, pp.323 -- 344, Aug. 1987.

[17]

出口光一郎,  
"カメラキャリブレーションの最近の動向,"  
情報処理学会コンピュータビジョン研究会, Vol.82, No.1, 1993

[18]

R. Kumar and A. R. Hanson,  
"Sensitive of the Pose Refinement Problem to Accurate Estimation of Camera Parameters," in Proc. of IEEE Third International Conference on Computer Vision, pp. 265 --369, Sep. 1990.

## 6. 謝辞

本研究を進めるにあたり，日頃から多くのご意見，ご指導を頂き，適切なご助言をして頂きました池田誠助教授に心から感謝しております．

また，本研究を行う上で，暖かいご指導を頂き，また良好な研究環境を与えて下さいました浅田邦博教授に深く感謝致します．

日頃から研究内容に対して数多くの貴重なご意見を下さいました吉田浩章氏，飯塚哲也氏には大変感謝しております．

研究活動においてのみでなく，他の様々な場面においても常に多くの助言を頂いた谷内出悠介氏に大変感謝しております．

さまざまな場で数多くの御助言，御支援を下さいました浅田研究室の助手鄭若丹<sup>シ</sup>氏，佐々木昌浩氏，大学院生の Mohamed Abbas Abdelrady 氏，田島貴明氏，山本一統氏，Dia Kin Hooi 氏，山内裕史氏，村田泰亮氏，金允環氏，梁志成氏，橋本紘和氏，風間大輔氏，石井健氏，曹溶成氏，門馬太平氏，技官の鈴木真一氏，秘書の横地順子氏，丸山由香子氏，および卒論生の皆様に深く感謝致します．