

## 運動物体軌道予測VLSIプロセッサの構成

### Architecture of a Trajectory-Prediction VLSI Processor for Moving Objects

○張山昌論, 畠山努, 亀山充隆,

○Masanori Hariyama, Tsutomu Hatakeyama, Michitaka Kameyama

東北大学

Tohoku University

キーワード: ビジュアルサーボ (Visual Servo), Immediate Output Generation, 専用 VLSI プロセッサ  
(Special-Purpose VLSI Processor) 雑音除去 (noise elimination)

連絡先: 〒980-77 宮城県 仙台市 青葉区 荒巻字青葉 東北大学大学院情報科学研究科 亀山研究室  
張山昌論, Tel.: (022)217-7154, Fax.: (022)263-9167, E-mail: hariyama@kameyama.ecei.tohoku.ac.jp]

#### 1. はじめに

動的に変化する環境下で作業を行なう知能ロボットシステムにおいては、ロボットの周囲に存在する運動物体の軌道予測が重要となる。このようなシステムの例として、本研究では投げられたボールを捕まるロボットシステムを考える。

キャッチングロボットでは以下の処理が、画像の取り込み間隔ごとに行なわれる。1) 画像取得 2) ボールの3次元座標計測 3) 軌道予測 4) 補球位置への移動ロボットの移動はボールの移動に比べ遅いため、ボールを捕まえる確率を向上するためには、ボールが遠くにある早い時点から、正確に軌道を予測し、そこへ向かって動く必要がある。

正確に軌道を予測する方法の一つとして、1) ~ 4) の処理を高速化し、画像の取り込み間隔を小さくすることが考えられる。このようにすれば、同じ時間により多くのボールの座標を計測できる

ため、軌道予測の精度を向上できる。しかしながら、計算量が多いため汎用のプロセッサでは高速化が困難である。

この問題を解決するために、処理時間が仕様として与えられた場合にプロセッサのチップ面積を最小化する軌道予測 VLSI プロセッサの構成を提案する。アルゴリズムとしては、ボールの計測に限定し、重心に着目することにより3次元計測の処理を単純化している。このアルゴリズムでは、画像のノイズが重心検出の精度に大きく影響を与えるため、ノイズ除去が必要となる。また、ノイズ除去は計算量が多く、ワークステーションでのシミュレーションでは全体処理時間が95%を占める。したがって、ノイズ除去では高並列処理が望まれ面積が大きくなるため、面積最小化設計が重要となる。

そこで、本稿では Immediate Output Generation に基づく面積最小化設計を提案する。Immedi-

ate Output Generation の考え方は、出力が複数ある場合に、できるだけ速く出力できるものから処理を行なっていくというものである。本アルゴリズムでは、画像の拡大または縮小を繰り返すノイズ除去を行なっている。拡大や縮小のための演算が簡単であるため、演算部よりも中間結果を記憶するためのバッファの容量を小さくすることが重要となる。そこで、Immediate Output Generation に基づき、出力をだせるものを先に計算することにより、中間結果がすぐ演算に使われることになり、バッファが不要となる。

チップレイアウトと回路シミュレーションによる評価を行なったところ、Immediate Output Generation を用いない場合と比べて面積が1/12に減少されている。

## 2. アルゴリズム

図1に軌道予測のフローチャートを示す。本アルゴリズムでは、画像に写るのはボールだけであると仮定し、重心に着目し3次元計測を高速化することを考える。そのため、もし重心が正確に検出できれば、従来の3次元計測で問題になるような、対応点探索による誤差はほとんどない。重心検出を正確に行なうためには、ノイズ除去が重要となる。図2にノイズ除去の処理を示す。ノイズ除去は白いノイズを除去するための画像の縮小、ボールに載った黒いノイズを除去するための画像の拡大を繰り返して行なう。この繰り返し回数ほどの程度のノイズを除去したいかによって決定される。ノイズを除去した後に、図3に示すように、ボールの端点を検出する。その結果を用いて、重心は次式により計算される。

$$\left( \frac{X_{min} + X_{max}}{2}, \frac{Y_{min} + Y_{max}}{2} \right)$$

軌道予測の有効性を確認するためにキャッチングロボットのシミュレーションを行なった。図6に

シミュレーションの環境を示す。ボールの時速は108km/hとし、ロボットマニピュレータはPTP制御され、移動中であっても目標点を変化することができる。画像の取り込み間隔を変え、それぞれの取り込み間隔に対して、10000回の試行を行なった。図7にその結果を示す。取り込み間隔を小さくするほど補球確率は向上することがわかる。しかしながら、1000 frame/secからは飽和している。これは、ボールの移動速度に対して取り込み間隔が小さい場合には、ほとんど止まっているのと同じ状態になるためであると考えられる。そこで、以下では1000 frame/secの場合の軌道予測VLSIプロセッサの構成を考える。

## 3. プロセッサアーキテクチャ

図8に全体の構成を示す。計算時間を考慮して、全体を2段のパイプラインで構成している。これによりそれぞれの処理を1000 frame/secで行なえばよいため、ハードウェア量を減少できる。図9にノイズ除去部の構成を示す。ノイズ除去は特に計算量が多い処理であるため、パイプラインと空間的並列構造を、Immediate Output Generation に基づき最適に導入している。すなわち、行なえる演算をできるだけすぐ行なうという考え方に基いて構成している。図10、図11にそれぞれ、端点検出部、軌道予測部の構成を示す。軌道予測と3次元座標計算で演算器を共有することにより、面積を減少している。図12にノイズ除去部のレイアウトを示す。0.8um CMOS設計ルールに基づき設計している。現在、イメージセンサ部を含む他の部分レイアウト中であるが、十分1チップ化が可能である。

## 4. おわりに

本稿で提案した Immediate Output Generation に基づくノイズ除去部の構成は、同様のデータフ

ローグラフを有する問題にも適用できる。また、今回は背景が非常に簡単な場合の画像処理を考えたが、より一般的な背景、例えばロボットや人間がボールと一緒に画像に写っている場合にボールを抽出するためには、より複雑な画像処理が必要となると考えられ、さらに専用 VLSI プロセッサ化のニーズが高まる。

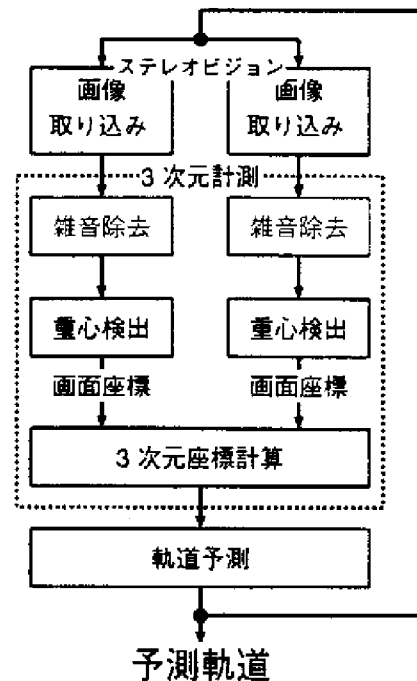
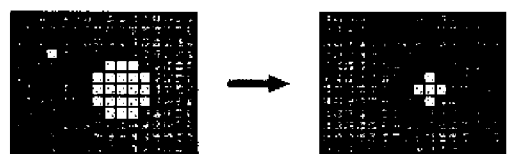


Fig. 1 軌道予測アルゴリズム

P00	P01	P02
P10	P11	P12
P20	P21	P22

縮小  $P_{11}' \leftarrow P_{00} \cap P_{01} \cap \dots \cap P_{22}$



拡大  $P_{11}' \leftarrow P_{00} \cup P_{01} \cup \dots \cup P_{22}$

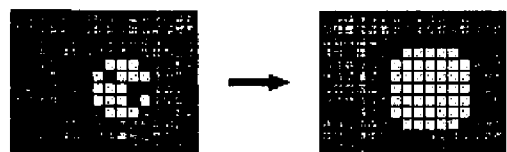


Fig. 2 ノイズ除去

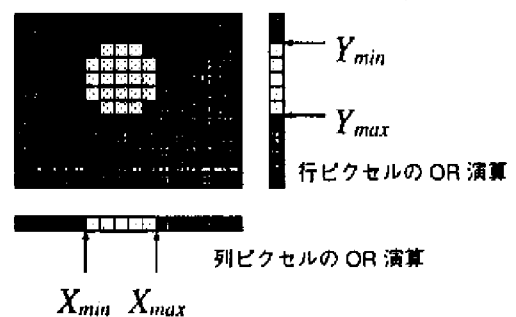
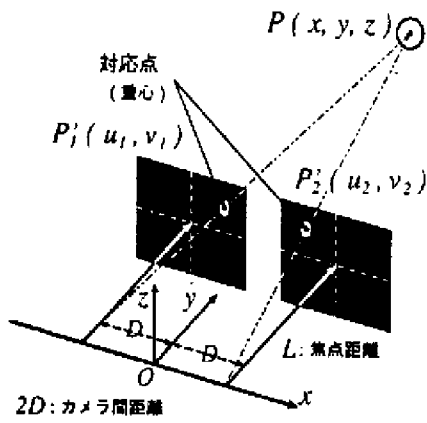


Fig. 3 端点検出



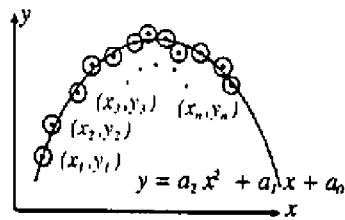
2D: カメラ間距離

3次元座標  
四則演算

$$x = D \frac{u_1 + u_2}{u_1 - u_2}, \quad y = \frac{2LD}{u_1 - u_2}$$

$$z = \frac{2Dv_1}{u_1 - u_2} = \frac{2Dv_2}{u_1 - u_2}$$

Fig. 4 ステレオビジョン



⊙: 計測された重心の座標

最小2乗法による補間2次曲線の推定

$$\begin{cases} (\sum_{i=1}^n x_i^4) a_2 + (\sum_{i=1}^n x_i^3) a_1 + (\sum_{i=1}^n x_i^2) a_0 = \sum_{i=1}^n x_i^2 y_i \\ (\sum_{i=1}^n x_i^3) a_2 + (\sum_{i=1}^n x_i^2) a_1 + (\sum_{i=1}^n x_i) a_0 = \sum_{i=1}^n x_i y_i \\ (\sum_{i=1}^n x_i^2) a_2 + (\sum_{i=1}^n x_i) a_1 + (\sum_{i=1}^n 1) a_0 = \sum_{i=1}^n y_i \end{cases}$$

四則演算 ⇒ 3次元座標計算部とのハードウェア共有

Fig. 5 最小自乗法に基づく軌道予測

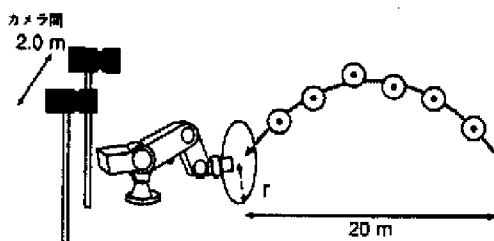


Fig. 6 キャッチングロボットシミュレーション

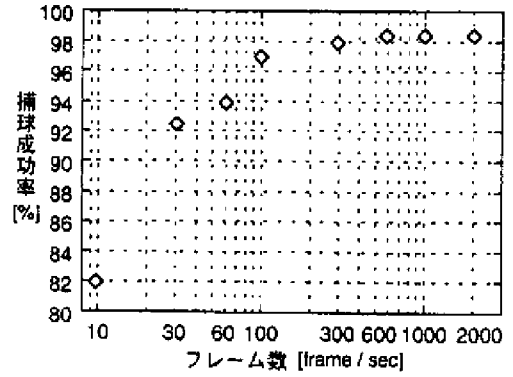
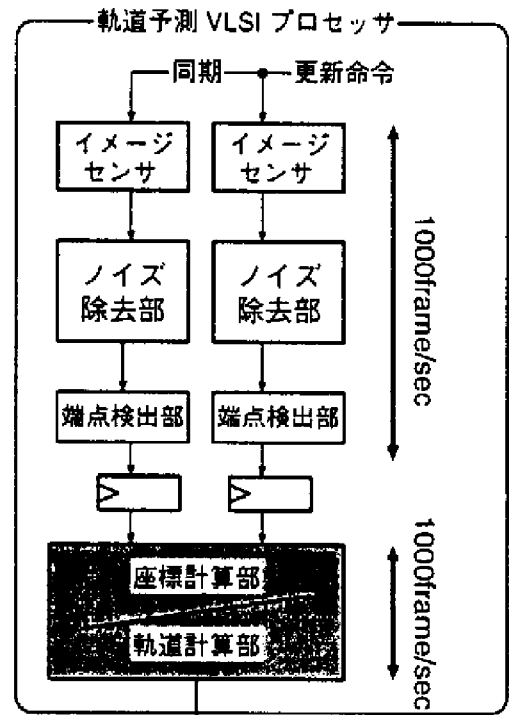


Fig. 7 シミュレーション結果



ロボットマニピュレータへ

Fig. 8 全体の構成

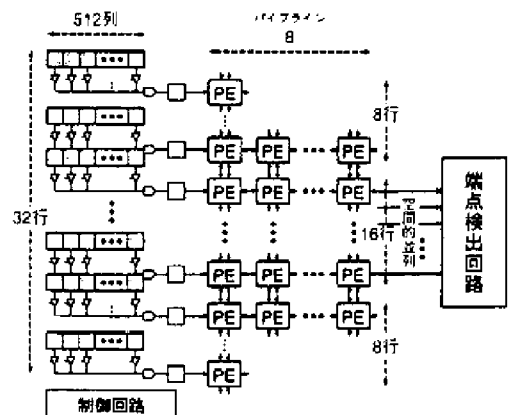


Fig. 9 ノイズ除去部の構成

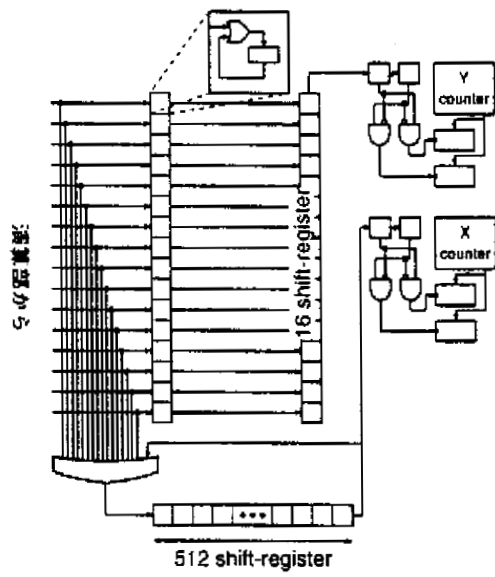


Fig. 10 端点検出部の構成

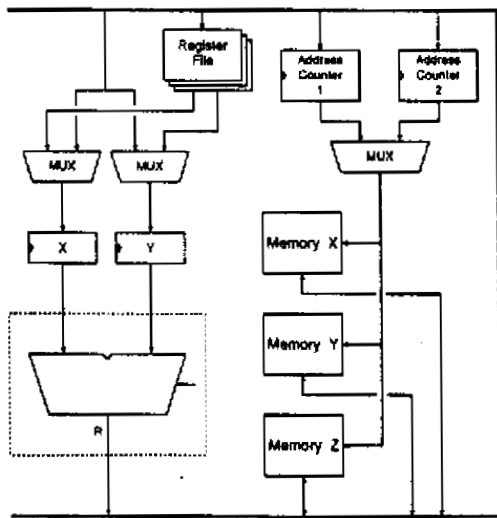


Fig. 11 軌道予測部の構成

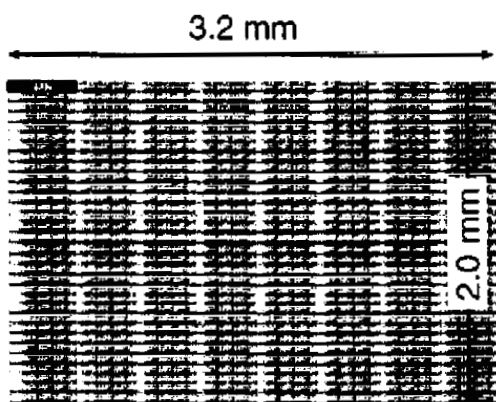


Fig. 12 ノイズ除去部レイアウト