

再帰的近似手法に基づいた高速射影変換器の設計と評価
Design and Evaluation of High-speed Projective Transforming Circuit
based on Recursive Approximation Approach

浜田 篤¹⁾
Atsushi HAMADA

近藤 真史²⁾
Masafumi KONDO

田所 勇生¹⁾
Yusei TADOKORO

横川 智教¹⁾
Tomoyuki YOKOGAWA

佐藤 洋一郎¹⁾
Yoichiro SATO

1 まえがき

エッジコンピューティングの発展を背景に、組み込みデバイスを用いた画像処理には高いニーズがあり、近年は電力効率に優れたFPGAを用いたハードウェア化が注目されている。これまで筆者らは、射影変換を対象に、多項式近似と漸化式表現により逐次加算のみに帰着する手法を提案している[1]。本研究はそのハードウェア化を目的として、二次の多項式で近似した場合の回路構成を提案する。そして、HDLにより固定小数点型ハードウェアを設計し、浮動小数点型を用いたソフトウェア実装と同程度の変換精度を維持できることを示す。

2 再帰的近似手法に基づいた射影変換法

画像に対する幾何学変換としては、変換後の座標 (u, v) から対応する変換前の座標 (x, y) を求めた上で、その近傍座標における画素値を用いて補間する(内挿)手続きが一般的である。射影変換の変換係数を $A \sim E$ とすると、変換前後における x 座標の関係は次式で表される。

$$x(u, v) = \frac{Au + Bv + C}{Du + Ev + 1} \quad (1)$$

変換後の画素の生成は、一般的に画像の左上から右へ順に行われ、各行および列の座標計算ではそれぞれ v および u は固定値となる。つまり、行単位でみると式(1)は u の1変数からなる単調関数となるため、除算を多項式で近似するときの次数は比較的low抑えることができる。例えば任意の行 v_e について、式(1)を二次関数で近似すると次式で与えられる。

$$x(u, v_e) \approx a_v u^2 + b_v u + c_v \quad (2)$$

式中の a_v, b_v, c_v は、 v_e 行における座標群に最小二乗法を適用して得られた近似係数である。さらに式(2)について、隣接する画素の座標、 $x(u-1, v_e)$ との関係を整理した上で、さらに一時変数 $\omega_v(u)$ を導入すると、

$$x(u, v_e) = x(u-1, v_e) + \omega_v(u) \quad (3)$$

$$\omega_v(u) = 2a_v u - a_v + b_v \quad (4)$$

$$\omega_v(u) = \omega_v(u-1) + 2a_v \quad (5)$$

となる。上式より、単に初期値 $x(0, v_e)$ 、 $\omega_v(0)$ 、 $2a_v$ を与えれば、各行の水平方向の座標は加算のみに帰着された漸化式で表現できる(以降、水平漸化式という)。一方、各行ごとに求まる近似係数から成る初期値を対象に、同様に関数近似と漸化式表現を垂直方向に適用することで、加算のみで算出できる。例えば、初期値 $x(0, v_e)$ は次式で与えられる(以降、垂直漸化式という)。

1) 岡山県立大学, Okayama Prefectural Univ.

2) 川崎医療福祉大学, Kawasaki Univ. of Medical Welfare

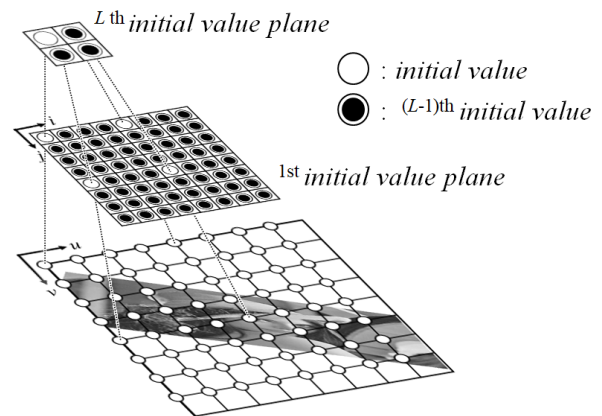


図1 再帰的近似手法と区間分割

$$x(0, v) = x(0, v-1) + \omega_u(v) \quad (6)$$

以上より、乗除算を含む式(1)は逐次加算に帰着できるが、近似による変換誤差を軽減するため、実用上は図1のように画像を複数の領域に分割した上で上述の手法を適用することになる。さらに各分割区間における初期値を保持する二次元配列を新たな座標平面(以降、初期値平面という)と見立て、上述の関数近似と漸化式表現を再帰的に適用することで、保持すべき初期値は段階的に削減され、限られたメモリ量で変換を実現できる。

3 座標算出回路の設計

2で述べた射影変換法は、変換座標のみならず、変換に係る近似係数から初期値に至るまで漸化式に基づいた逐次加算で算出する。したがって、漸化式を計算するための回路モジュールを単位として、それを組み合わせることで射影変換器の実現を図る。

3.1 回路構成

提案する射影変換器における座標算出回路の構成を図2に示し、各部の説明を以下に記す。

RM: 漸化式を計算するための基本回路モジュール。 n ビットの加算器とレジスタ(**Reg**)によるアキュムレータとして構成され、**Reg**に格納されている値に対して a の逐次加算を行い、その結果を総和 **sum** として出力する。**Reg**の値は、選択信号 **Sel**により制御され、**Sel**='0'ならば **sum**、'1'ならば初期値 b の値が適宜格納される。

SRM: 水平漸化式、すなわち式(3)および(5)を処理するための回路モジュール。各式の漸化式に対応する2基の**RM**により構成され、式(5)に対応する上段の**RM**の**sum**は、 $\omega_v(u)$ として下段の**RM**に入力・利用される。

Ctrl: 各回路モジュールを制御する回路。画像サイズと

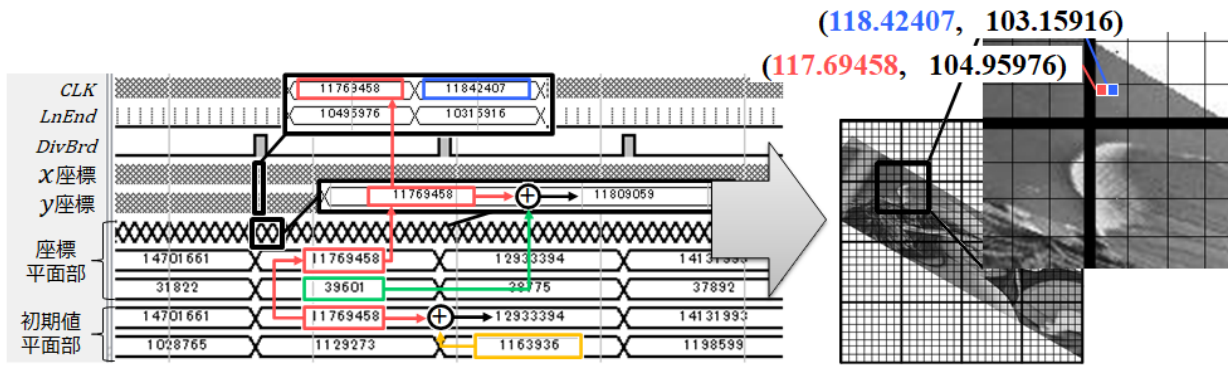


図3 シミュレーション波形から再構成した射影変換画像

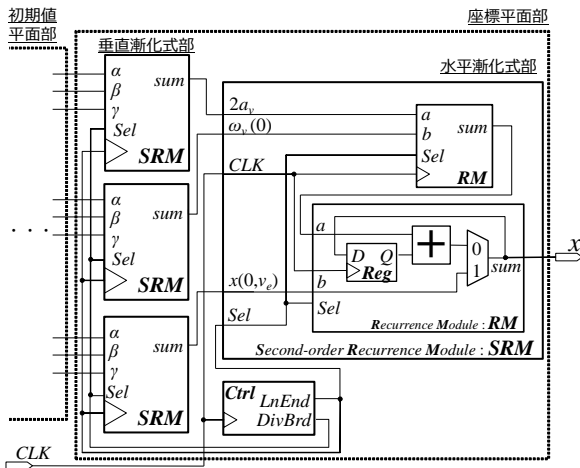


図2 座標算出回路の構成

区間分割数に応じたカウンタであり、現在の区間における行の走査が完了するタイミングで LnEnd、区間が切り替わるタイミングで DivBrd をそれぞれアサートする。

図1における座標平面の展開では、初期値 $x(0, v_e)$, $\omega_v(0)$, $2a_v$ それぞれに対応した垂直漸化式の回路モジュールが必要となるが、これは SRM と同様の構成で実現できる。したがって、上述の3変数に対応した SRM を設けた上で、Ctrl の制御タイミングに従って適宜各変数の算出結果を水平漸化式の SRM にアサートすることにより、座標平面に係る変換座標を算出できる。さらにこれと同様の構成を以って初期値平面に対応する回路群を構成可能であり、それを介して上記3変数それぞれの算出に係る初期値 α, β, γ を入力することとなる。

3.2 動作

まず、各回路に与えられた初期値より、座標平面および初期値平面における左上画素・区間に対する計算が開始される。RM によって画像の0行目の変換座標が逐次算出され、現在の区間における行の末尾への走査が完了したタイミングで LnEnd がアサートされる。このとき、垂直漸化式部の3基の SRM で次の行に対する初期値が生成され、それを基に水平漸化式部の RM の初期値 (Reg) が更新される。これを現在の区間の末行まで繰り返した後 DivBrd がアサートされると、初期値平面部より次の区間に対する初期値が生成され、座標平面部を構成する回路モジュール群の初期値が同様に更新される。その後も同様の動作を経て、画像全体の区間・行に対する変換座標を逐次加算のみで算出できる。

表1 画像評価

近似次数 (初期値)	近似画像比		原理画像比	
	PSNR[dB]	SSIM[%]	PSNR[dB]	SSIM[%]
一次近似	59.824	99.993	24.703	85.429
二次近似	57.620	99.972	39.484	99.184

4 シミュレーションと評価

図2の座標算出回路を VHDL で設計し、入力画像 (512 × 512 pixel) に対するシミュレーション波形を基に変換画像を再構成した結果を図3に示す。座標平面、初期値平面の区間分割数はそれぞれ 32×32, 4×4 であり、座標平面には一次関数近似 [2] を用いた。提案回路におけるデータパスのビット数 n は、小数点第5位までを表現可能な固定小数点で $n = 32$ とした。図中のシミュレーション波形は、同右の変換画像上の2点に係る変換後座標とその際の近似係数・初期値を表している。図中に示した加算過程より、初期値平面部で生成された初期値が座標平面部へ入力され、それに加算を繰り返すことで適切に変換後座標が生成されていることが分かる。さらに、整数演算に伴う変換精度を確認するため、式(1)の原理式および文献 [1] の関数近似と漸化式表現それぞれに基づいて得られた画像の画質評価結果を表1に示す。一般的に PSNR:40[dB] 以上、SSIM:98% 以上で画質上の差異は認められないため、原理画像比では特に初期値近似の次数が一次の場合に画質の劣化が目立つ。一方、近似画像比では、提案のハードウェア構成による演算でも高精度な射影変換が実現されていることを確認できる。

5 あとがき

本研究では、再帰的近似手法に基づいた射影変換における座標算出部のハードウェア構成を提案し、所望の動作と十分な変換精度を確認した。今後は内挿回路等の周辺回路を統合した高速射影変換器の設計と防犯カメラシステム等への応用を目指す予定である。

謝辞 本研究は、岡山県「令和2年度次世代産業研究開発プロジェクト創成事業」の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] 田所 勇生, 近藤 真史, 他, “自由視点防犯カメラへの応用を前提とした射影変換における再帰的近似手法,” 信学技報 (ICTSSL), Vol.117, No.401, pp.45-50 (Jan. 2018)
- [2] 浜田 篤, 近藤 真史, 他, “加算のみに帰着した射影変換法における座標算出回路の設計,” 2020年度電気・情報関連学会中国支部連合大会, R20-26-01-02 (Oct. 2020)