실시간 비디오 스타일 전이 기법에 관한 연구

Real-time Style Transfer for Video

서상현*
(Sang Hyun Seo)

요 약

텍스처전이(Texture Transfer) 기법은 타겟영상의 고주파 성분인 텍스쳐를 소스영상에 적용시키는 영상처리 방법이다. 이 텍스쳐 전이기법은 입력 영상에 표현되고 있는 질감 등의 스타일을 대상 영상에 전이시키는데 사용 될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 텍스쳐 전이기법을 비디오에 적용시키기 위한 방법을 제안한다. 특히 동영상에 적용시키기 위한 실시간 병렬 처리 알고리즘을 제안한다. 이를 위해서 기존 텍스쳐 전이기법에 사용되는 커널의 모양을 변경하여 병렬화가 가능하도록 하였으며, 동영상 적용 시 발생하는 시간적 일관성문제를 해결하기 위한 방법으로 비디오 프레임 영상의 다중해상도를 사용한 광류측정법을 제안하여 적용함으로써 실시간 비디오 처리를 가능하게 하였다.

■ 중심어 : 실시간 처리 ;, 스타일 전이 기법; 비디오 텍스쳐 전이;

Abstract

Texture transfer is a method to transfer the texture of an input image into a target image, and is also used for transferring artistic style of the input image. This study presents a real-time texture transfer for generating artistic style video. In order to enhance performance, this paper proposes a parallel framework using T-shape kernel used in general texture transfer on GPU. To accelerate motion computation time which is necessarily required for maintaining temporal coherence, a multi-scaled motion field is proposed in parallel concept. Through these approach, an artistic texture transfer for video with a real-time performance is archived.

■ keywords : Real-time Processing; Artistic Style Transfer; Video Texture Transfer;

Ⅰ. 서 론

최근 인터넷과 스마트기기가 보편화되면서, 동영상을 다루는 기술은 멀티미디어 분야가 중요해졌다. 많은 사람들이 동영상을 공유하고, 스트리밍 서비스를 제공하는 사이트(YouTube, Vimeo, Facebook, Twitter 등)를 통해 동영상 스트리밍 서비스를 이용하고 있다. 동영상 서비스가 다양한 분야에 사용되고 있지만, 동영상에 독특한 시각적 효과를 주는 전 처리 기술은 적용에 어려움을 겪고 있다. 이것은 각 프레임에 적용해야 하는 문제로 인해 너무 많은 연산을 요구하기 때문이다.

예술적인 동영상 처리는 동영상 컨텐츠를 새롭게 만드는데 유용하게 쓰일 수 있는 기술이다. 만약 동영상을 실시간으로 처리할 수 있는 필터가 제공된다면, 사용자들은 원래의 동영상에서 벗어나 다양한 스타일의 컨텐츠를 생산하고 공유할 수 있을 것이다[15].

본 논문에서 사용하는 텍스쳐 전이(Texture Transfer)기술은 원본 이미지(Source)와 타겟(Target)이미지를 이용한다[7].

타겟 이미지의 고주파 대역을 원본 이미지의 텍스쳐에 적용하여 스타일을 바꾸는 역할을 한다. 이러한 텍스쳐 전이는 타겟 이미지가 전반적인 구조를 유지하면서 원본 이미지의 예술적인 스타일을 타겟 이미지에 전이시킬 때 사용될 수 있다. 텍스쳐 전이 기술로 각각의 예술적 스타일별로 별도의 알고리즘을 개발하는 것이 아니라 원본 이미지의 스타일을 전이시키기 때문에 다양한 스타일을 갖는 예술적인 이미지를 만들 수 있는 장점이 있다.

* 정회원, 성결대학교 공과대학 미디어소프트웨어학부
이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2016R1D1A1B03935378)
접수일자 : 2016년 11월 22일
수정일자 : 1차 2016년 12월 21일, 2차 2016년 12월 26일
게재확정일 : 2016년 12월 26일
교신저자 : 서상현 e-mail : shseo75@gmail.com

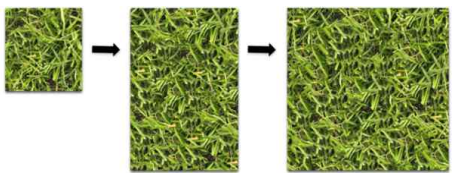
텍스쳐 전이 알고리즘은 각각의 픽셀을 수평선 순서대로 합성한다. 이러한 절차를 따르면 사전에 합성된 픽셀들은 다른 합성 단계에 영향을 주게 되어 있다. 이런 종속성은 병렬의 과정에서 문제가 발생한다. 텍스쳐 전이 알고리즘은 빠른 연산을 위해 설계되었지만 실시간으로 사용하기엔 속도가 충분하지 않다. 또한 비디오의 각 프레임마다 예술적인 효과를 넣기 위해서는 시간적 일관성(Temporal Coherence)을 필수적으로 유지해야 한다.

본 연구에서는 예술적 전이기법의 실시간 처리를 위해 픽셀 사이의 종속성을 제거 하여 병렬처리를 가능하게 하였으며, 일관성 유지를 위한 기술인 프레임간 모션 추정 방법을 제안한다.

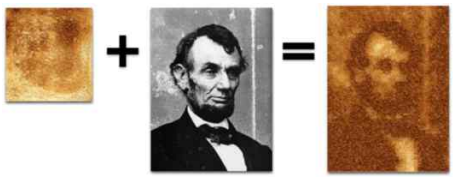
Ⅱ. 관련 연구

컴퓨터 그래픽스 분야에서 텍스쳐 합성(Texture Synthesis) 기술은 널리 연구되어 왔다[1-6]. 이러한 연구는 대부분 작은 원본 텍스쳐에서 무작위로 고품질의 텍스쳐를 생성하고 예술적인 스타일이 아닌 자기 유사성을 통한 큰 텍스쳐 구성에 초점이 맞춰져있다.

텍스쳐를 이용하여 입력 영상의 자기유사성을 이용하여 영상을 스타일화하기 위한 방법으로 자동적으로 일관성을 갖는 큰 텍스쳐를 생산할 수 있다. 이러한 접근은 효과적으로 텍스쳐 생성 등의 결과를 생성하지만, 연산 속도가 현저하게 떨어지기 때문에, 실시간으로 적용하여 이용되기에 적합하지 않다. 더구나 이 알고리즘은 한 이미지가 다른 이미지에 겹쳐지므로 입력 영상이 두 개가 필요하다. 따라서 이 방법을 사용하는 것은 적합하지 않다.



(a) 텍스쳐 합성



(b) 텍스쳐 전이(Texture Transfer)

그림 1. 텍스쳐 합성 과 텍스쳐 전이 기법의 차이

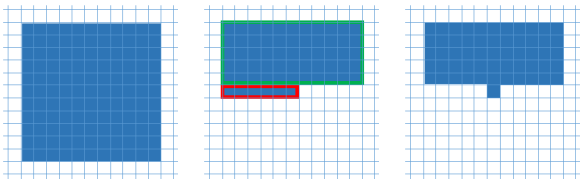
Ashikhmin은 자신이 소개한 텍스쳐 합성 기술을 바탕으로 텍스쳐 전이(Texture Transfer) 방법을 제시하였다[6,7]. 이 방법은 원본 이미지의 예술적인 스타일을 효과적으로 타겟 이미지에 전이할 수 있었다. 그의 방법은 두개의 원본 이미지가 아닌 단 하나의 원본 이미지만 있으면 된다. 그의 방법은 다른 방법에 비해 현저하게 속도가 빠르지만 실시간 처리를 위해서는 새로운 접근법이 필요했다. 그림 1은 텍스쳐 합성방법과 텍스쳐 전이기법의 차이를 보여주고 있다.

본 연구에서는 그가 실행했던 방법에 기초하여서 병렬 구조(parallel framework)를 활용하여 실시간 처리를 하고자 한다. Lee 등은 Ashikhmin의 방법을 확장된 기술을 제시하였다[8]. 그들이 제시한 확장된 방법에서는 예술적인 텍스쳐의 중점을 맞추었다. 타겟 이미지의 방향성을 그대로 유지하면서 텍스쳐 전이를 실시하는 알고리즘이다.

Ye 등은 역시 시간적 일관성(temporal coherence)을 갖는 텍스쳐 전이기법을 위한 알고리즘을 제시하였다[9]. 그들의 접근 방식은 시간적 일관성을 향상시키기 위해 각 프레임 사이에 움직임 변화를 추정하여 사용한다. 움직임에 근거하여 합성된 이전의 프레임으로부터 후보군을 선출하기 때문에, 시간적 일관성을 잘 유지될 수 있다.

Kang 등은 의 접근 방식을 확장한 방법을 제시하였는데, 타겟 동영상의 방향성을 유지하면서 원본 이미지의 텍스쳐를 타겟 동영상에 전이시키는 방식을 사용하였다[[9,10].

본 연구에서는 시간적 일관성을 향상하는 방법에 기초하여서, 실시간 동영상 처리가 가능하도록 연산능력을 높이는 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 GPU를 활용한 병렬화에 초점을 맞춘다[14].



(a)Box (b) L-shape (c) T-shape

그림 2. 텍스쳐 전이기법에서 사용되는 커널모양 및 제안된 T-shape 커널I.

Ⅲ. 실시간 동영상 텍스쳐 전이를 위한 병렬화

1. 텍스쳐 전이기술의 병렬처리

Ashikhmin이 제시한 텍스쳐 전이 알고리즘은 원본 이미지와 소스 이미지, 총 두개의 이미지로부터 시작된다[7]. 알고리즘의 초기단계에서는 초기 결과가 복사된 타겟 이미지로부터 생성된다. 결과물의 각 화소는 원본 이미지에서부터 임의적으로 선택된 화소로 대체된 화소이다. 이때 매핑 함수 $m(x)$)는 타겟 이미지의 화소 x로부터 원본 이미지에서 임의로 선택된 픽셀을 매핑하는 과정을 이야기 한다. 다음으로 결과물의 수평선에 있는 모든 픽셀에 대해 순서대로 진행한다. 각 픽셀 p는 다음의

수도코드와 같이 생성된다. 다음의 수도코드에서 설명하는 커널의 모양은 그림 2-(c)에서 보여주고 있다.

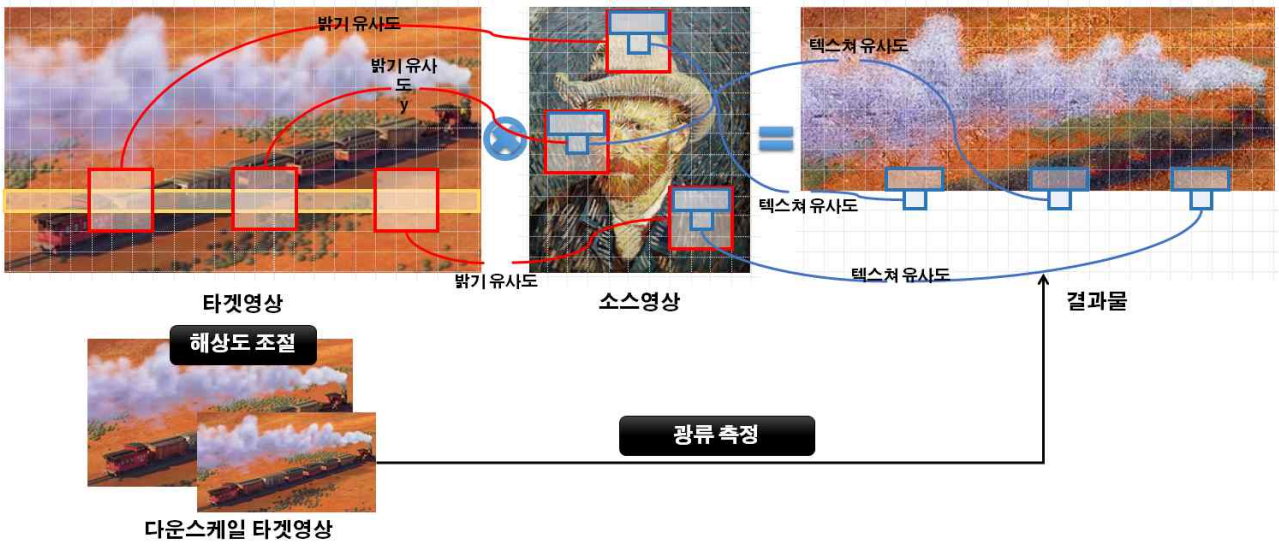


그림 3 실시간 텍스쳐 전이기법을 위한 병렬 구조
(각 해당라인의 각각의 픽셀들은 커널에 따라 병렬 처리됨)

단계 1: 후보군의 집합을 생성한다.
$Q\{m(p)+(q-p)|q\in K_L\}(p)\}$, $K_L(x)$는 L-Shape 커널

단계 2: 소스에서 랜덤하게 픽셀을 선택해 미리정의된 확률을 갖는 Q에 넣는다.

단계 3: 베스트 후보군을 Q로부터 찾는다 기준은 다음의 식을 최소화 한다.

$$D(p,q)=D_B(p,q)+D_L(p,q),$$
$$D_B(p,q)=\left|\overline{T(x)}-\overline{S(x)}\right|, x\in K_B(p), y\in K_B(q),$$
$$D_L(p,q)=\parallel H_R(p)-H_S(q)\parallel,$$
$$H_R(p)=\left\{R(x)-\overline{R(x)}|x\in K_L(p)\right\},$$
$$H_S(p)=\left\{S(x)-\overline{S(x)}|x\in K_L(p)\right\},$$

여기서, $K_B(x)$)는 그림 2의 Box 커널이며, $T(x)$, $S(x)$ 그리고 $R(x)$는 각각 타겟, 소스 그리고 결과 픽셀의 밝기값이 된다.

Step 4. $R(p)$를 $S(m(q))$로 대체한다.

이 단계는 반복적으로 수행될 수도 있다.

앞서 설명한 방법은 성능을 향상시키기 위한 병렬화에 적합하지 않다. L-모양의 커널에 포함되는 픽셀들 사이의 종속성(Dependency) 때문이다. 이러한 종속성은 병렬화를 위한 적절한 동작을 보장하지 않기 때문에 종속성을 제거하여 해야 한다. L-모양 커널은 커널의 중앙선으로 부터 돌출된 부분(그림 2(b)의 빨강색)과 다른 부분(그림2 (b)의 파랑색), 두 개의 부분으로 나눌 수 있다. 그 둘 중 돌출된 부분이 다른 부분에 비해 상대적으로 작다. 커널의 중앙 부분을 제외면, 픽셀과 중앙부분 사이의 종속성이 감소되므로, 같은 평행선에 존재하는 각 픽셀에 대해 병렬 연산이 가능해 진다.

본 연구에서는$K_T(x)$로 표현되는 커널을 정의했으며 이를 T 모양의 커널이라 부른다. 제안된 알고리즘에서는 설명된 수도코드에서 Step 3의 $K_L(x)$를 $K_T(x)$로 대체하여 적용하고 수평선 상에 있는 각 픽셀에 대해 동시에 수행할 수 있도록 하였다. 한 수평 라인의 모든 픽셀에 대해 최적의 후보군으로 교체한 이후 다음 행으로 이동하도록 병렬 알고리즘을 설계하였다.

다시 말해, 제안된 알고리즘은 동일한 행의 모든 픽셀은 동시에 처리되며, 각 행은 순차적으로 처리된다고 할 수 있다. 이러한 방법을 통해 텍스쳐 전이 연산 속도를 매우 크게 향상시킬 수 있다. 향후 텍스쳐 전이 알고리즘은 결과물의 합성 품질을 향상을 위해 지속적으로 사용될 수 있다.

본 연구에서 개발된 병렬 알고리즘은 기존의 접근법에 비해 수평에 대한 종속도가 현저하게 낮다. 알고리즘을 반복적으로 적용할 때, 타겟 이미지, 소스 이미지, 결과 이미지를 90도씩 회전시킴으로써 발생되는 이질감을 매 반복마다 조절함으로써 대부분의 시도에서 만족스러운 결과물을 얻을 수 있었다.

그림 3은 본 연구에서 제안한 T-shape 커널 기반 병렬화 및 다음 장에서 설명할 다중 해상도를 이용한 광류측정 방법을 보여주고 있다.

2. 비디오를 위한 텍스쳐 전이기법

입력 동영상에 텍스쳐 전이 알고리즘을 적용하기 위해선, 시간적인 일관성이 유지되어야 한다. 비디오의 각 프레임에 독립적으

로 텍스쳐 전이를 수행할 경우 주변 프레임의 텍스쳐 사이에 연관성이 떨어지기 때문에 플리커링 현상이 발생한다. Ning Ye 등은 역방향 모션을 통해 후보군을 예측하고, 이전 프레임에 합성된 텍스쳐의 픽셀을 대체하였다[9]. 이 방법으로 시간적 일관성이 향상되었다. 본 연구에선 영상 실시간 처리를 위한 병렬화 처리에 그들의 방식을 적용하였다. 가장먼저 비디오의 첫 번째 프레임에 대해서, 하나의 이미지에 대해 제안된 텍스쳐 전이 기법을 적용한다. 다음으로 두 번째 프레임 이후부터 아래와 같은 절차를 실행한다.

Step 1. 현재 프레임과 이전 프레임 사이의 모션 $f(x)$)를 계산한다.

Step 2: 현재 프레임의 초기 결과물 $R_i(x)$를 $R_{i-1}(f^{-1}(x))$로 대체함으로써 현 프레임의 초기 결과 R_i를 계산하고, 소스로 향하는 매핑함수 $m(x)$구축한다.

Step 3: 현 프레임의 한 라인에 아래의 동작을 수행한다.

(a) 라인위의 각 필셀에 대해서. 아래과정을 병렬진행

- 다음을 만족하는 후보군을 얻는다,
  $Q\{m(p)+(q-p)|q\in K_T(p)\}$, $K_t(x)$ T-shape 커널임
- 소스에서 랜덤하게 픽셀을 선택해 미리 정의된 확률을 갖는 Q에 넣는다.
- 다음의 값이 최소화 되는 베스트 후보 q를 Q로부터 얻는다.

$$D(p,q)=D_B(p,q)+D_K(p,q)+D_F(p,q),$$
$$D_B(p,q)=\left|\overline{T(x)}-\overline{S(x)}\right|, x\in K_B(p), y\in K_B(q),$$
$$D_K(p,q)=\parallel H_R(p)-H_S(q)\parallel,$$
$$H_R(p)=\left\{R(x)-\overline{R(x)}|x\in K_K(p)\right\},$$
$$H_S(p)=\left\{S(x)-\overline{S(x)}|x\in K_K(p)\right\},$$
$$D_F(p)=C(p)\bullet\left|S(q)-R_{i-1}(p+f^{-1}(p)\right|,$$

여기서, $C(x)$ 모션의 정확성을 나타내는 Confidence로 다음과 같이 정의된다.

$$C(x)=G(\nabla F(x);\sigma_f^2)\bullet G(T_i(x)-T_{i-1}(x+f^{-1}(x));\sigma_I^2$$

$G(\bullet;\sigma^2)$ variance값이 2인 zero-mean Gaussian 함수

-$R_i(p)$를 $S(m(q))$로 대체한다.

(b) 한 라인에 모든 픽셀의 처리가 끝나면 처리가 멈추고, 현재 프레임의 다음 라인으로 이동하여 (a)(b)를 반복한다.

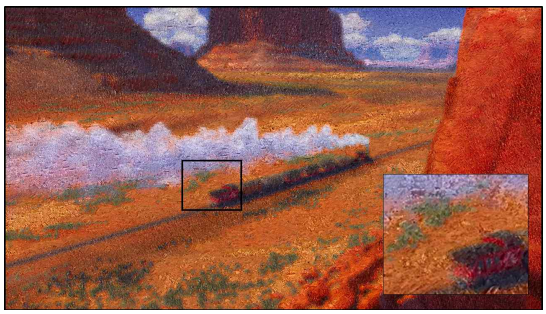
Step 4. 모든 라인위에 있는 텍스쳐들이 전이되고 나면 다음 프레임으로 넘어가고 Step 1-4를 반복한다.

본 연구에서는 빠른 연산속도를 위해, 텍스쳐 전이 부분에 병렬 계산을 이용한다. 하지만 입력 영상에 대한 모션 추정에는 복합적이고 많은 연산이 필요하기 때문에, 모션 추정은 병목 현상의 주범이 된다. 모션 추정을 위해 본 연구에서는 광류를 이용한 방식(optical flow method)을 이용하였으며[13], 이 기술은 실시간으로 처리하기 위해서 성능이 많이 부족함을 알 수 있다. 본 연구에서는 모션 추정에 걸리는 병목 현상을 완화하기 위해 해상도를 낮추는 방식으로 진행하였다. 주어진 입력 동영상의 해상도를 낮추고, 광류 측정 알고리즘을 GPU를 통해 실시간 처리하였으며, 측정된 결과를 다시 원래 영상의 해상도로 복원해 줌으로써 보간 된 광류정보를 생성하였다.

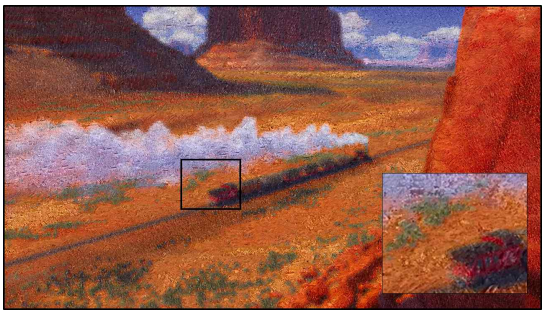
IV. 실험 결과

본 연구에서는 제안된 방법은 다음의 개발 환경에서 실험하였다. GPU 병렬화를 위해 CUDA[11]를 이용하였으며 개발은 OpenCV[12]를 이용하여 병렬 구조화를 실시하였다. 제안된 알고리즘의 실험환경은 RAM : 8GB, GPU : NVIDIA Geforce GTX980, CPU : Intel i5 3.1Ghz 이며 쉐이더 3.0이상의 모델을 지원하는 최신의 그래픽 하드웨어가 필요하다.

(a) 사용된 영상



(b) 기존 연구[7]

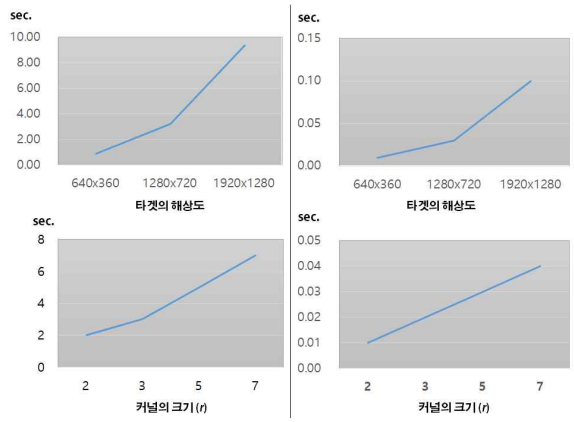


(c) 제안된 전이기법

그림 4. 고흐의 자화상을 이용한 결과물 비교

그림 4는 한 장의 영상에 대한 텍스쳐 전이 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 결과물는 질적으로 차이가 거의 없음을 볼 수 있다. 실험에서 커널 반지름 r은 5로 실시하였다.

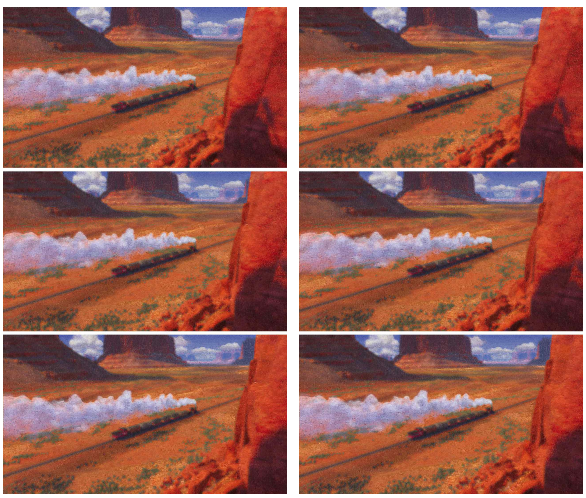
예술적인 텍스쳐 전이 적용에 Ashikmin의 방법에 따라 타겟 이미지의 채도는 유지하면서 원본 이미지의 밝기 그림 값 만을 변경하였다[7].



(a) 기존 연구[7] (b) 제안된 전이기법

그림 5. 타겟의 해상도 및 커널의 크기에 따른 텍스쳐 전이 기법 성능 비교

그림 5는 기존 Ashikmin의 알고리즘 과 본 연구에서 제안된 알고리즘의 성능을 보여주고 있다. 본 연구는 타겟의 해상도와 커널의 반지름 크기를 변경해 가며 실험을 하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 단일 이미지를 텍스쳐 전이하는 데 걸리는 시간을 비교해 봤을 때 10배 이상의 성능향상이 있음을 볼 수 있었으며 제안된 단일 이미지를 통한 예술적인 스타일 전이 알고리즘은 실시간 적용이 가능하다는 것을 볼 수 있었다.

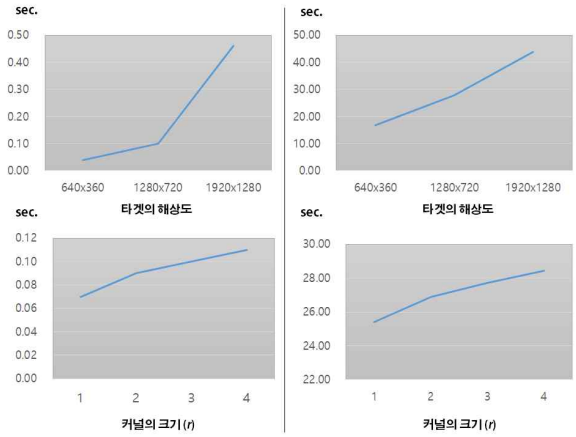


(a) 기존 연구 [9] (b) 제안된 알고리즘

그림 6. 고스의 자화상을 소스로 활용했을 경우 기존 연구와의 결과 비교

추가적으로 비디오에 적용했을 경우의 결과를 이를 위해서 Ye가 제안한 방법[9]과 본 연구에서 제안한 병렬화 기법의 결과와 성능을 비교하였다. 그림 6은 한 번의 반복과 파라미터 sm의 값으로 2를 사용하였을 경우의 프레임별 결과를 보여 주고 있다. 제안된 알고리즘은 시간적 일관성(temporal coherence)을 유지하면서도 준수한 전이 결과를 보여 줌을 알 수 있다. 그림 7은 제안된 알고리즘의 성능을 보여주고 있다. Ye의 방법에 비해 매우 향상된 연산 속도를 나타냄을 볼 수 있다. 실험 환경 내에서 동영상의 실시간 처리가 가능함을 확인할 수 있다.

그림 8는 타겟 비디오를 변경했을 경우의 결과물을 보여주고 있다. 텍스쳐 전이와 시간적 일관성이 잘 유지됨을 알 수 있다.



(a) 기존 연구[21] (b) 제안된 전이기법

그림 7. 타겟의 해상도 및 커널의 크기에 따른 비디오 텍스쳐 전이 기법 성능 비교

(a) 소스 영상

(b) 프레임별 결과물

그림 8 제안된 비디오 텍스쳐 전이 기법에 의한 결과물

III. 결 론

스트리밍 영상의 예술적인 효과 전이를 위해 실시간 텍스쳐 전이 방법을 본 연구에서 제시하였다. 성능을 높이기 위해 본 연구에서는 T형태의 커널을 병렬형태로 사용하였다. 또한 시간적 일관성을 유지하기 위해 필요한 모션 추정 연산 성능을 높이기 위해서는 비디오 각 플레임의 영상을 축소하여 사용하였다.

향후 예술적인 효과의 질을 높이기 위해, 세일리언시 정보를 활용하여 추상화정도(LoA, Level of Abstraction)를 계산하고, 텍스쳐 전이 알고리즘에 적용하는 연구를 진행해야 한다. 또한 텍스쳐의 방향[15] 또한 예술적 텍스쳐 전이기법에 중요한 요소 중에 하나이다. 이러한 텍스쳐의 방향성을 적용하는 알고리즘을 병렬화 하는 작업이 이루어진다면 보다 좋은 결과물을 얻을 수 있을 것이다.

References

[1] J. S. De Bonet. "Multiresolution sampling procedure for analysis and synthesis of texture images," in Proc. of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH97, pp.361 - 368, 1997.

[2] A. A. Efros and W. T. Freeman. "Image quilting for texture synthesis and transfer," in Proc. of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.341 - 346. ACM, 2001.

[3] C. Eisenacher, S. Lefebvre, and M. Stamminger. "Texture synthesis from photographs," Computer Graphics Forum, vol.27, pp.419 - 428. Wiley Online Library, 2008.

[4] S. Lefebvre and H. Hoppe. "Appearance-space texture synthesis," ACM Trans. Graph., vol.25, no.3, pp.541 - 548, July 2006.

[5] L. Liang, C. Liu, Y.-Q. Xu, B. Guo, and H.-Y. Shum. "Real-time texture synthesis by patch-based sampling," ACM Trans. Graph., vol.20, no.3, pp.127 - 150, July 2001.

[6] M. Ashikhmin. "Synthesizing natural textures," in Proc. of the 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics, pp.217 - 226, New York, NY, USA, 2001.

[7] M. Ashikhmin. "Fast texture transfer," Computer Graphics and Applications, IEEE, 23(4), pp.38 - 43, 2003.

[8] H. Lee, S. Seo, and K. Yoon. "Directional texture transfer with edge enhancement," Computers & Graphics, pp.81 - 91, 2011.

[9] N. Ye, T. Sim, and X. Miao. "Video stylization by single image example," in Proc. of ICIP 2010 pp.3993 - 3996. 2010.

[10] D. Kang, P. Kong, K. Yoon, and S. Seo. "Directional texture transfer for video," Multimedia Tools and Applications, , vol. 74, no. 1, pp.245 - 258, 2015.

[11] C. Nvidia. Compute unified device architecture programming guide. 2007.

[12] G. Bradski and A. Kaehler. "Learning OpenCV: Computer vision with the OpenCV library," O'ReillyMedia, Inc.", 2008.

[13] J. Marzat, Y. Dumortier, and A. Ducrot. "Real-time dense and accurate parallel optical flow using cuda," 2009.

[14] 김정인, 최창, 김판구, "비디오 내 이동 객체의 색인 정보를 이요한 궤적 유사도 측정 기법", 스마트미디어학회논문지 제1권 3호, pp. 43-47, 2012년 9월.

[15] 홍택은,김정인,신주현, "인스타그램 이미지와 텍스트 분석을 통한 사용자 감정 분류 ", 스마트미디어학회논문지 제5권 1호, pp. 61-68, 2016년 3월.

저 자 소 개

서상현(정회원)

1998년 중앙대학교 컴퓨터공학과 학사 졸업

2000년 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 석사 졸업

2010년 중앙대학교 첨단영상대학원 영상공학과 박사 졸업.

2010년~2011년 중앙대학교, 박사후연구원

2011년~2013년 프랑스 리옹 1대학, LIRIS, Post-Doc

2013년~2016년 한국전자통신연구원, 선임연구원

2016년~현재 성결대학교 미디어소프트웨어학부 조교수

<주관심분야>컴퓨터그래픽스, 가상/증강현실,게임기술