

# 고성능/저전력 3D Geometry 연산을 위한 CORDIC 기반 off-line 벡터회전 알고리즘

김은옥<sup>0\*</sup> 이정근<sup>\*\*</sup> 이정아<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>조선대학교 컴퓨터공학과

eunok26@gmail.com, jalee@chosun.ac.kr

<sup>\*\*</sup>한림대학교 컴퓨터공학과

Jeonggun.Lee@hallym.ac.kr

## CORDIC-Based Off-line Vector Rotation Algorithm for High-Performance and Low-Power 3D Geometry Operations

Eunok Kim<sup>0\*</sup> Jeonggun Lee<sup>\*\*</sup> Jeonga Lee<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Dept. of Computer Engineering, Chosun University

<sup>\*\*</sup>Dept. of Computer Engineering, Hallym University

### 1. 서 론

최근 3D 컴퓨터 그래픽 응용 분야가 급속히 성장하면서, 3D 그래픽의 효율적 처리를 위한 연구가 많이 진행되고 있다. 특히, 휴대용 기기를 위한 고성능/저전력의 3D 그래픽 처리기에 대한 연구가 필요한 시점이다. 최근 CORDIC 기술을 3D 컴퓨터 그래픽스에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있으나, 기존의 CORDIC 알고리즘을 이용하여 3D 연산을 처리하는 방식은 많은 반복 횟수를 필요로 한다는 단점을 지니고 있다. 본 논문에서는 3D 그래픽 처리에 효과적인 CORDIC 구조를 구성하기 위하여, 오프라인 CORDIC 알고리즘으로 제안된 MSR-CORDIC 알고리즘을 3D 연산에 적용될 수 있도록 새롭게 구성한다. 새롭게 확장된 MSR-3D 알고리즘은 단위 벡터를 기준으로 3D 벡터 회전 시에 최소의 반복 연산만으로도 원하는 회전을 수행할 수 있는 최적의 기본각 회전 시퀀스를 오프라인(off-line)으로 미리 검색하여 적용하기 때문에 기존의 방법에 비해 적은 반복만으로 원하는 연산이 수행된다.

### 2. 연구 배경

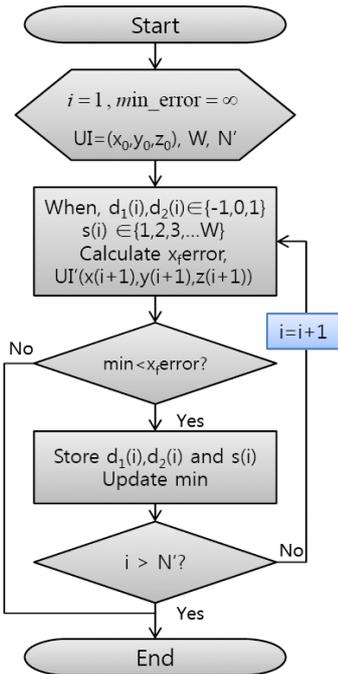
CORDIC(COordinate Rotational Digital Computer)은 삼각함수를 비롯한 여러 가지 초월 함수의 계산을 효율적으로 할 수 있는 연산기술이다. Jack E. Volder에 의해 고안 되었으며, 쉬프트와 덧셈만을 이용하여 2차원 벡터회전과 같은 복잡한 연산을 수행할 수 있기 때문에 다양한 분야에서 활용되고 있다. 2차원 연산에만 사용되던 CORDIC 알고리즘을 3차원에서 적용하기 위해 확장된 CORDIC-3D 회전 알고리즘은 매우 효과적인 3D 처리 연산으로 볼 수 있다[1]. 그러나, 2D CORDIC 알고리즘에서와 마찬가지로 데이터 패스의 비트 폭 'N' 만큼의 반복적인 연산을 모두 수행해야 하므로 Latency와 같은 성능 특성이나 전력 소모 측면에서 시스템의 설계 사양을 만족시키지 못할 수 있다.

### 3. 제안하는 MSR-3D 회전 알고리즘

큰 반복횟수로 인한 오버헤드를 감소시키기 위해 본 논문에서는 2차원 CORDIC 알고리즘의 개선을 위해 제안된 MSR(Mixed Scaling Rotation)-CORDIC[2]과 같은 맥락으로 오프라인에서 사전에 주어진 입력 3차원 좌표에 대한 최적의 시퀀스를 검색하고 이를 이용하여 회전함으로써 반복횟수를 줄이는 방법을 제안한다. 제안 알고리즘은 오프라인에서의 시퀀스 검색(오프라인 벡터링) 단계와 벡터링 후 회전 단계로 이루어진다.

오프라인 벡터링을 위해 본 논문에서는 (그림 1)의 그리디(greedy) 최적화 알고리즘을 이용하였다. 이는 현재의 반복단계에서 최적의 시퀀스로 결정되는 지역적 최적해를 통해 전체의 최적해를 이끌어내는 방식이다. 검색의 조건은 입력 벡터가 x축에 접하는 단위벡터에 수렴하도록 하였다. N'은 제안하는 MSR-3D에서의 반복횟수를, U는 회전을 시작하는 위치를 나타낸다. 기존의 CORDIC-3D 알고리즘은 방향시퀀스만을 변경하면서 회전하였던 것과 달리 MSR-3D는 오프라인 시퀀스 검색을 통해 각 반복횟수 i마다 가장 적절한 방향시퀀스  $d_1(i), d_2(i)$ 와 회전시퀀스  $s(i)$ 를 찾아 이를 이용하여 회전하게 된다. 검색기준이 되는 여러 성능의 지표(parameter)  $x_f error$ 는 다음과 같이 계산된다.  $x_d$ 는 회전 후 벡터의 이상적인 크기(norm)를 나타내며, 벡터링 단계에서는 단위벡터에 접근하도록 하였으므로  $x_d$ 는 1이 된다.

$$x_f error = x_d - x_f, \quad x_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2 + z_d^2}, \quad x_f = x(i+1)$$



(그림 1) Greedy 알고리즘의 흐름도

벡터링 후 회전단계는 오프라인 단계에서 벡터링을 통해 얻은 방향시퀀스와 회전시퀀스를 이용하여 (그림 2)와 같이 실제 회전을 수행한다.

1) 초기화:  $(x[1], y[1], z[1]) = (x_0, y_0, z_0)$   
 2) 반복식:  
 For  $j=1$  to  $n'$   
 $x[j+1] = x[j] - 2^{-s(j)+1} x[j] + d_1(j) 2^{-s(j)+1} y[j] + d_2(j) 2^{-s(j)+1} z[j]$   
 $y[j+1] = y[j] - d_1(j) 2^{-s(j)+1} x[j] - d_1(j) d_2(j) 2^{-2s(j)+1} z[j]$   
 $z[j+1] = z[j] - d_2(j) 2^{-s(j)+1} x[j] - d_1(j) d_2(j) 2^{-2s(j)+1} y[j]$

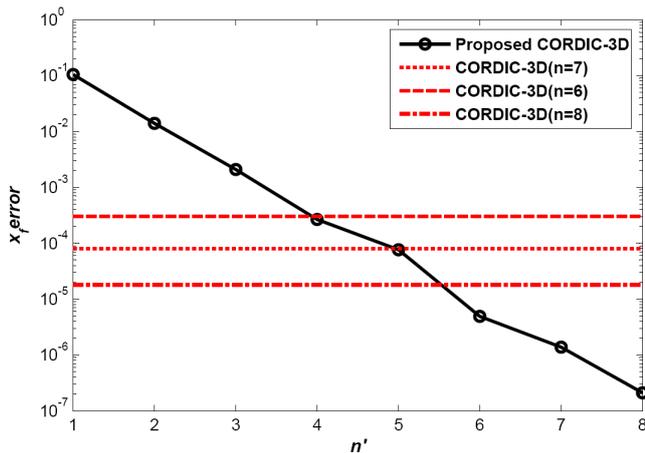
(그림 2) MSR-3D의 벡터링 후 회전 알고리즘

4. 실험결과

(그림 3)는 MSR-3D에서 반복횟수  $N'$ 에 따른 에러성능  $x_ferror$ 의 변화를 나타낸 것이다. CORDIC-3D 알고리즘의 반복횟수  $N'$ 이 6, 7, 8인 경우의 에러율을 표시하여 이와 비교하였다. 이 때, 제안 알고리즘의 경우 검색과정 자체에 스케일링 효과가 적용되어 있기 때문에 적절한 비교를 위해서는 기본 MSR-3D의 벡터회전 단계의 반복횟수  $N$ 과 함께 스케일링에 소요되는 반복횟수까지 함께 고려하여야 한다. CORDIC-3D에서의 벡터회전과 스케일링 단계에 각각 소요되는 반복횟수의 비율을 2D CORDIC에서와 비슷한 수준으로 놓을 경우, 스케일링을 위한 비용은 평균적으로  $N/3$  반복횟수 정도가 소요된다[3]. 따라서, 각 알고리즘의 전체 반복횟수는 (표 1)과 같이 정리된다. 본 논문에서 제안하는 MSR-3D

벡터회전을 적용하였을 경우  $2N/3$ 의 반복만으로도 CORDIC-3D와 동일한 에러율을 가질 수 있다. 따라서 CORDIC-3D와 비교하여 MSR-3D는 50%의 반복횟수 감소 효과를 보임으로써 계산 속도를 크게 향상시킬 수 있다. 덧붙여, 전력 소모에 대해 고려해 볼 때, Voltage Scaling 방법을 적용하여 상당한 전력 소모 효과를 예상해 볼 수 있다. 디지털 회로의 전력 소모  $P$ 는  $C(V_{DD})^2 f$ 에 비례한다. 회로의 지연 시간  $T$ 가  $V_{DD}$ 에 비례한다고 가정하자. 본 논문에서는 기존의 성능 지연  $T$ 를 반으로 줄였기 때문에,  $V_{DD}$ 를 반으로 줄이면서도 기존 알고리즘과 유사한 성능을 갖게 되는데, 이때의 전력 소모는  $C(V_{DD}/2)^2 f = 1/4 * C(V_{DD})^2 f$ 로 기술된다. 이는 기존 방법의 전력 소모의 1/4만이 필요하다는 것을 의미한다.

5. 결론



(그림 3) MSR-3D에서의  $x_ferror$ 와 반복횟수  $N'$ 의 관계

본 논문에서는 모바일 기기에 적합한 고성능 3D Geometry 연산의 처리를 위해, 오프라인 알고리즘인 MSR-CORDIC을 3차원으로 확장한 MSR-3D 알고리즘을 제안하고 성능을 평가하였다. 오프라인 응용에만 적용된다는 단점을 갖고 있으나, 제안된 알고리즘은 기존의 CORDIC-3D에 비해 전체 회전 소요시간에서 50%의 감소 효과를 보였다. 더불어 향상된 성능향상은 전력 소모 감소로 이루어질 수 있으며, 최대 기존 전력 소모의 75% 감소효과를 기대할 수 있었다.

(표 1) CORDIC-3D와 MSR-3D의 반복횟수 비교

|       | CORDIC-3D[2]                                  | MSR-3D |
|-------|---|--------|
| 반복 횟수 | $4N/3$<br>(rotation "N" + scaling cost "N/3") | $2N/3$ |

참고문헌

[1] Tomás Lang and Elisardo Antelo, "High-Throughput CORDIC-based Geometry Operations for 3D Computer Graphics", IEEE Trans. on Computers, Vol.54, No.3, pp.347~361, Mar. 2005.  
 [2] C. H. Lin, A. Y. Wu, "Mixed-scaling-rotation CORDIC(MSR-CORDIC) algorithm and architecture for high-performance vector rotational DSP applications," IEEE Trans. Circuits and Systems Part-I: Fundamental Theory and Applications, Vol. 52, No. 11, pp. 2385 - 2396, Nov. 2005.  
 [3] Y. H. Hu, "CORDIC-based VLSI architectures for digital signal processing," IEEE Signal Processing Mag., pp. 16-35, July 1992.