

정밀한 로봇 피니싱을 위한 Geodesic Hermite 곡선 기반 가공 경로 계획

Tool Path Planning Using Geodesic Hermite Spline for Accurate Robotic Finishing on 3D Mesh

김 의 찬¹ · 심 재 훈² · 김 연 우¹ · 이 승 연³ · 심 재 훈³ · 최 혁 렬[†]

Eui-Chan Kim¹, Jae Yoon Shim², Yonoo Kim¹, Seung Yeon Lee³,
Jae Yoon Sim³, and Hyouk Ryeol Choi[†]

Abstract: This paper presents a Geodesic Hermite Spline-based tool path planning method for precise robotic finishing on 3D mesh surfaces. Traditional methods, such as iso-parametric and iso-plane approaches, rely on indirect planar projections, often leading to uneven paths due to surface curvature changes. In contrast, the proposed method generates tool paths directly on the surface, allowing for smoother trajectory alignment with surface geometry. Additionally, a unique normal vector smoothing technique is applied using barycentric coordinates, enabling seamless normal vector transitions across adjacent triangles and reducing abrupt directional changes in tool paths. Experimental results validate the effectiveness of the method, demonstrating stable and continuous normal data across waypoints. This approach enhances the accuracy and stability of robotic finishing, making it suitable for complex surface geometries.

Keywords: Tool Path Planning, Geodesic, Spline, Normal Vector Smoothing

1. 서 론

최근 3D 모델을 활용해 작업물의 표면 형상을 반영한 가공 경로 생성 방식이 도입되고 있다. 기존의 iso-parametric (ISP) 방식과 iso-plane 방식은 모두 작업물 표면에 간접적인 평면을 생성하여 작업 경로를 생성하는 방식으로, 작업물 표면의 곡률 및 평면의 위치, 방향에 따라 균일하지 않은 경로가 생성될 수 있다는 한계를 지닌다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 작업물의 표면 위에서 직접적으로 작업 경로를 생성하는 Geodesic 방식을 제안한다. 특히 단순한 직선 경로가

아닌 Geodesic 방식을 Hermite 곡선에 결합하여 표면의 곡률에 정밀하게 적응하는 곡선 경로 생성을 목표로 한다[2]. 또한 삼각형 면 내의 각 경로점에 barycentric 좌표 기반의 서로 다른 법선 벡터를 할당하여 법선 벡터가 부드럽게 이어지도록 스무딩 처리하였다[3]. 이로 인해 작업 경로의 정밀성이 향상되어 더욱 정확한 표면 가공이 가능해진다.

2. 공구 경로 생성

2.1 Hermite 곡선

Hermite 곡선은 데이터 보간을 위한 기본적인 기법이다. 두 점 p_0, p_1 과 그에 해당하는 접선 벡터 v_0, v_1 이 주어지고, $u \in [a, b]$ 에서 정의된 Hermite 곡선 $C(u)$ 가 $C(a) = p_0, C(b) = p_1, C'(a) = v_0, C'(b) = v_1$ 를 만족할 때, Hermite 곡선은 다음과 같이 표현될 수 있다.

※ This project was funded by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE)(P0026249)

1. School of Intelligent Robotics, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea (euichan00@g.skku.edu)

2. School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

3. Researcher, AIDIN ROBOTICS Inc., Anyang, Korea

† Professor, Corresponding author: Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea(choihyoukryeol@gmail.com)

$$C(u) = b_0 B_0^3(t) + b_1 B_1^3(t) + b_2 B_2^3(t) + b_3 B_3^3(t) \quad (1)$$

이 때, b_i 는 $u \in [a, b]$ 내에서 정의되는 제어점이고, $B_0^i(t)$ 는 Hermite 곡선을 Bézier 곡선 형태로 표현하기 위해 사용되는 Bernstein 기저함수이다.

$0 \leq t \left(= \frac{u-a}{b-a} \right) \leq 1$ 인 조건에서 제어점은 다음과 같다.

$$b_0 = p_0 \quad (2)$$

$$b_1 = p_0 + \frac{b-a}{3} v_0 \quad (3)$$

$$b_2 = p_1 - \frac{b-a}{3} v_1 \quad (4)$$

$$b_3 = p_1 \quad (5)$$

2.2 Hermite 곡선의 Geodesic 표현

삼각 메쉬 위에서 Geodesic Hermite 곡선을 계산하기 위해서는 메쉬 상의 점과 벡터 간의 확장된 연산이 필요하다. 확장된 연산을 거친 Hermite 곡선의 Geodesic 표현은 다음과 같다.

$$C(t) = b_0(1-t)^3 \oplus 3b_1(1-t)^2t \oplus 3b_2(1-t)t^2 \oplus b_3t^3 \quad (6)$$

여기서 \oplus 와 \ominus 는 Geodesic 벡터의 덧셈 및 뺄셈을 의미하고, $0 \leq t \left(= \frac{u-a}{b-a} \right) \leq 1$ 인 조건에서 제어점은 다음과 같다.

$$b_0 = P_i \quad (7)$$

$$b_1 = P_i \oplus \frac{d_g(P_i, P_{i+1})}{3} \hat{v}_{p_i} \quad (8)$$

$$b_2 = P_{i+1} \ominus \frac{d_g(P_i, P_{i+1})}{3} \hat{v}_{p_{i+1}} \quad (9)$$

$$b_3 = P_{i+1} \quad (10)$$

$d_g(P_i, P_{i+1})$ 는 점 P_i 와 P_{i+1} 사이의 Geodesic 거리를 의미한다. \hat{v}_{p_i} 는 점 P_i 에서의 접선 벡터를 의미한다.

2.3 법선 벡터 스무딩

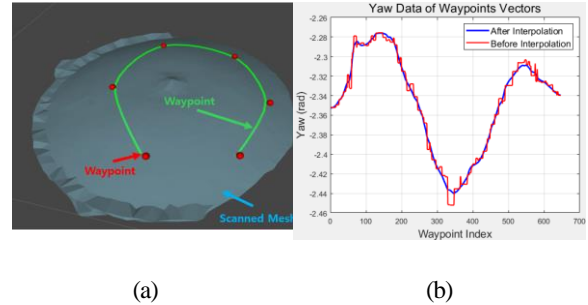
삼각형 메쉬 표면에서 인접한 삼각형 면 F_1 과 F_2 의 법선 벡터 \vec{n}_{F_1} 과 \vec{n}_{F_2} 는 큰 차이를 가질 수 있다. 만약 F_1 내 경로점들에 \vec{n}_{F_1} 을 일괄적으로 할당하면, F_1 에서 F_2 로 경로가 이동할 때 법선 벡터가 급변할 수 있다. 이를 최소화하기 위해 경로점의 법선 벡터를 삼각형 면 내에서 가변적으로 할당한다. 이 때 삼각형의 꼭짓점의 법선 벡터를 사용하고, 꼭짓점의 법선 벡터를 구하기 위해서는 꼭짓점이 속해 있는 면의 법선 벡터의 평균을 통해 구한다. 꼭짓점 v_i 의 법선 벡터를 \vec{n}_{v_i} 로 정의하고,

경로점 p 가 삼각형 면 F_1 내에 위치할 때 p 의 법선 벡터는 barycentric 좌표($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$)로 표현하여 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{n}_p = \lambda_1 \vec{n}_{v_1} + \lambda_2 \vec{n}_{v_2} + \lambda_3 \vec{n}_{v_3} \quad (11)$$

여기서 $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ 을 만족한다. 이렇게 계산된 법선 벡터 \vec{n}_p 는 삼각형 면 내의 경로점의 법선 벡터를 부드럽게 연결하며, 경로 상에서 법선 벡의 급격한 변화가 발생하지 않도록 한다.

3. 실험 결과



[Fig.1] (a) Mesh of Workpiece with Geodesic Hermite Spline Tool Path; (b) Comparison of Yaw Data of Waypoints' Vectors Before and After Interpolation

실험은 3D 메쉬 데이터 위에 경로점을 설정하고, Geodesic Hermite 곡선을 생성하여 법선 벡터를 스무딩하는 방식으로 진행되었다. 작업물 메쉬 표면 위에 경로점을 설정해준 이후, 해당 경로점을 지나는 Geodesic Hermite 곡선을 C++로 작성된 코드를 이용해 [Fig.1](a)와 같이 생성하였다. [Fig.1](b)는 생성된 Geodesic Hermite 곡선의 점들에 메쉬의 표면 정보를 이용해 할당한 법선 벡터의 전후 Yaw 데이터의 그래프이다. 스무딩 전에는 법선 벡터의 Yaw 값이 비연속적이고 불안정하지만, 스무딩 후에는 연속적이고 안정화된 것을 확인할 수 있다.

References

- [1] Ha, Yujin, Jung-Ho Park, and Seung-Hyun Yoon. "Geodesic Hermite Spline Curve on Triangular Meshes." *Symmetry* 13.10 (2021): 1936.
- [2] Orazi, Leonardo, and Barbara Reggiani. "A novel algorithm for a continuous and fast 3D projection of points on triangulated surfaces for CAM/CAD/CAE applications." *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences* 34.4 (2022): 1240-1245.