



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2015년11월19일
(11) 등록번호 10-1570359
(24) 등록일자 2015년11월13일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
B23Q 15/20 (2006.01) G05B 19/18 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2014-0168453
(22) 출원일자 2014년11월28일
심사청구일자 2014년11월28일
(56) 선행기술조사문헌
JP2013215843 A
KR1019990074740 A
KR100833112 B1

(73) 특허권자
한국델컴 (주)
서울특별시 구로구 디지털로 272 ,709(구로동, 한신아이티타워)
(72) 발명자
김권일
서울특별시 영등포구 당산로42길 16, 509동 1101호 (당산동4가, 당산현대5차아파트)
오제연
서울특별시 은평구 불광로 122-10, 3102동 604호 (불광동, 북한산힐스테이트3차아파트)
(74) 대리인
특허법인 정안

전체 청구항 수 : 총 12 항

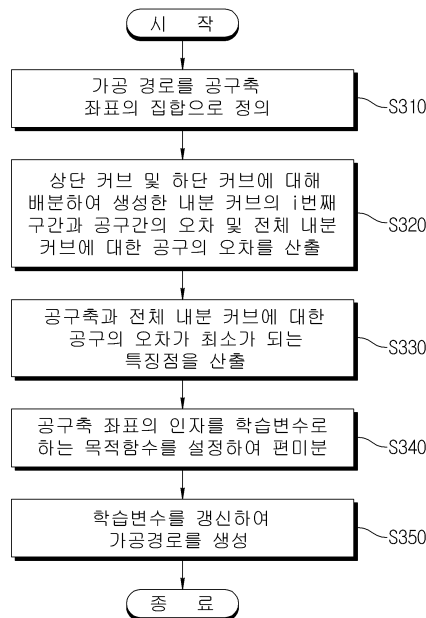
심사관 : 김응상

(54) 발명의 명칭 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법 및 시스템

(57) 요약

본 발명은 임펠러의 가공 시에 테이퍼 공구를 사용하여 선직면(ruled surface)을 플랭크 가공하는 경우에 효율적으로 오차를 추정하고, 추정된 오차를 목적함수로 정의한 다음 목적함수의 1차 미분값으로 학습 변수들을 수정해 가공 경로에 대한 과삭 및 미삭 비율을 조절하여 기계학습에 사용되는 경사 하강(gradient descent) 기법으로 최적 (뒷면에 계속)

대표도 - 도3



적화 된 가공 경로를 생성할 수 있도록 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법 및 시스템에 관한 것이다. 본 발명에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템은, 각 블레이드의 선직면(S)과, 각 선직면 상의 상단 커브 및 하단 커브를 이용하여, 상기 상단 커브 및 하단 커브에 대해 내분하여 생성한 내분 커브의 i번째 구간과 공구 간의 오차(e_{ki}) 및 전체 내분 커브(m_i)에 대한 공구의 오차(e_k)를 산출하는 오차 산출부; 상기 공구축과 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출하는 특징점 산출부; 및 상기 공구축 좌표의 인자(p_i, a_i)를 학습변수($\Theta=(p_i, a_i)$)로 하는 목적함수($E_i(\Theta=(p_i, a_i))$)를 설정하여 편미분하고, 상기 학습변수를 갱신하여 가공경로를 생성하는 가공경로 생성부를 포함하는 것을 특징으로 한다.

(72) 발명자

김성근

서울특별시 은평구 은평로4길 12-6, 101호 (응암동)

이덕희

경기도 부천시 원미구 역곡로20번길 91, 402동 1007호 (역곡동, 역곡대림e-편한세상4차아파트)

김태운

서울특별시 구로구 경인로 382, 115동 2201호 (개봉동, 한마을아파트)

오광민

경기도 부천시 소사구 경인로463번가길 22, 201호 (괴안동, 거스화이트빌리지)

명세서

청구범위

청구항 1

(a) 각 블레이드의 선직면(S)과, 각 선직면 상의 상단 커브 및 하단 커브를 이용하여 가공 경로를 공구축 좌표 [T(k)=(p(k), a(k))]의 집합으로 정의하는 단계;

(b) 상기 상단 커브 및 하단 커브에 대해 내분하여 생성한 내분 커브의 i번째 구간과 공구 간의 오차(e_{ki}) 및 전체 내분 커브(m_i)에 대한 공구의 오차(e_k)를 산출하는 단계;

$$e_{ki} = d_{ki} - r(h_{ki}), e_k = \min_i e_{ki}$$

(c) 상기 공구축과 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출하는 단계;

$$c_k = \arg \min_{ck} e_k$$

(d) 상기 공구축 좌표의 인자(p_i, a_i)를 학습변수(θ=(p_i, a_i))로 하는 목적함수(E_i(θ=(p_i, a_i)))를 설정하여 편미분하는 단계; 및

(e) 상기 학습변수를 다음 수학식에 따라 갱신하여 가공경로를 생성하는 단계;

를 포함하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법.

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \eta \frac{\partial E}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_{old}}$$

여기서, η 는 학습계수(Learning rate)를 나타낸다.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 (a) 단계에서, k 시점에서 공구 끝점의 좌표(p(k))와 공구축의 방향(a(k))에 따라 공구축은 직선 p(k)+h · a(k) 상에 위치하는 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법.

청구항 3

청구항 1에 있어서,

상기 (a) 단계에서, 공구의 테이퍼 각도가 φ이고, h₀ 위치에서의 공구 반경이 r₀ 인 경우, h 위치에서의 공구 반경은 r(h)=r₀+(h-h₀)tan φ 인 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법.

청구항 4

청구항 1에 있어서,

상기 (a) 단계에서, 다음 수학식에 따른 임의의 내분 커브([m_i(λ)]_{i=1...N})의 각 점들은 항상 각 블레이드의 선직면(S) 상에 위치한 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법.

$$m_i(\lambda) = (1-\lambda)u_i + \lambda v_i, 0 \leq \lambda \leq 1$$

청구항 5

청구항 1에 있어서,

상기 (b) 단계는, 공구의 테이퍼 각도와, 공구 반경, 공구축 및 내분 커브의 i번째 구간 사이의 최단거리를 이용하고, 상기 공구 반경은 $r(h_{ki})=r_0+h_{ki}\tan\phi$ 인 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법.

청구항 6

청구항 1에 있어서,

상기 (b) 단계에서, 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 0보다 크면 미삭, 0보다 작으면 과삭으로 인식하는 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법.

청구항 7

청구항 6에 있어서,

상기 과삭을 미삭보다 줄여야 하는 경우, $f_{overcut}$ 의 값을 $f_{undercut}$ 보다 크게 설정하면, 상기 과삭에 대해서 상기 미삭보다 $f_{overcut}/f_{undercut}$ 배만큼 변경이 가능한 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법.

청구항 8

각 블레이드의 선직면(S)과, 각 선직면 상의 상단 커브 및 하단 커브를 이용하여 가공 경로를 공구축 좌표 $[T(i)=(p(i), a(i))]$ 의 집합으로 정의하고, 상기 상단 커브 및 하단 커브에 대해 내분하여 생성한 내분 커브의 i번째 구간과 공구 간의 오차(e_{ki}) 및 전체 내분 커브(m_i)에 대한 공구의 오차(e_k)를 산출하는 오차 산출부;

상기 공구축과 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출하는 특징점 산출부; 및

상기 공구축 좌표의 인자(p_i, a_i)를 학습변수($\Theta=(p_i, a_i)$)로 하는 목적함수($E_i(\Theta=(p_i, a_i))$)를 설정하여 편미분하고, 상기 학습변수를 갱신하여 가공경로를 생성하는 가공경로 생성부;

를 포함하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 공구축은 k 시점에서 공구 끝점의 좌표($p(k)$)와 공구축의 방향($a(k)$)에 따라 직선 $p(k)+h \cdot a(k)$ 상에 위치하고, 공구의 테이퍼 각도가 ϕ 이고, h_0 위치에서의 공구 반경이 r_0 인 경우, h 위치에서의 공구 반경은 $r(h)=r_0+(h-h_0)\tan\phi$ 인 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템.

청구항 10

청구항 8에 있어서,

상기 공구의 테이퍼 각도와, 공구 반경, 공구축 및 내분 커브의 i 번째 구간 사이의 최단거리를 이용하고, 상기 공구 반경은 $r(h_{ki})=r_0+h_{ki}\tan\phi$ 인 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템.

청구항 11

청구항 8에 있어서,

상기 가공경로 생성부는, 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 0보다 크면 미삭, 0보다 작으면 과삭으로 인식하는 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템.

청구항 12

청구항 11에 있어서,

상기 과삭을 미삭보다 줄여야 하는 경우, $f_{overcut}$ 의 값을 $f_{undercut}$ 보다 크게 설정하면, 상기 과삭에 대해서 상기 미삭보다 $f_{overcut}/f_{undercut}$ 배만큼 변경이 가능한 것을 특징으로 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은 플랭크 정삭 가공 방법 및 시스템에 관한 것으로서, 더욱 자세하게는 임펠러의 가공 시에 테이퍼 공구를 사용하여 선직면(ruled surface)을 플랭크 가공하는 경우에 효율적으로 오차를 추정하고, 추정된 오차를 목적함수로 정의한 다음 목적함수의 1차 미분값으로 학습 변수들을 수정해 가공 경로에 대한 과삭 및 미삭 비율을 조절하여 기계학습에 사용되는 경사 하강(gradient descent) 기법으로 최적화 된 가공 경로를 생성할 수 있도록 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법 및 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002]

일반적으로, 플랭크 가공(Flank milling)은 공구의 옆면으로 절삭하는 가공기법으로, 스왑 가공(Swarf milling)이라고도 불리며 항공 부품, 터빈 등의 복잡한 형상의 면을 가공하는데 널리 쓰이고 있다.

[0003]

또한, 공구의 끝으로 가공하는 포인트 가공에 비해 공구 부하가 크고 가공조건을 맞추기가 까다롭지만, 생산성이 좋고 조건이 잘 맞을 경우 품질도 훌륭하다는 장점 때문에 일부러 플랭크 가공에 적합하도록 제품 설계를 하는 경우도 흔하다.

[0004]

그 대표적인 예가 바로 펌프나 압축기, 특히 자동차의 터보 차저 등에 쓰이는 부품인 임펠러(Impeller)이다. 고속, 고온, 고압의 환경에서 유체를 압축하거나 이동시키기 때문에 진동과 파손을 방지하기 위한 세심한 설계와 정밀 5축 가공이 필수적이다. 또한 5축 가공 시장이 확대되면서 기술력을 확인하기 위한 벤치마크 테스트 대상으로 자주 선정되는 제품이기도 하다.

[0005]

임펠러 가공은 선반으로 쉬라우드(Shroud) 면을 가공한 다음에 5축 가공기를 사용해서 황삭, 허브 정삭과 블레이드 정삭을 진행한다. 이때 블레이드 정삭은 포인트 가공 또는 플랭크 가공을 사용하는데, 블레이드의 면이 직선들로 구성된 선직면(ruled surface)인 경우 플랭크 가공이 적용된다.

[0006]

블레이드의 형상이 선직면(ruled surface)으로 제한되지만, 포인트 가공에 비해 생산성이 높기 때문에 대부분의 임펠러는 선직면(ruled surface)으로 이루어진 블레이드 면을 가지고 플랭크 가공으로 제작된다.

[0007]

그리고 근래 들어 공구 부하로 인한 문제들을 완화하기 위해 테이퍼 공구(Tapered tool)를 사용하는 경우가 늘어나고 있다. 하지만 일반 원통형 공구에 비해 가공 경로 생성과 해석이 난해하다는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

[0008] (특허문헌 0001) 한국 등록특허공제 제833,112호(등록일 : 2008년05월22일)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0009] 전술한 문제점을 해결하기 위한 본 발명의 목적은, 임펠러의 가공 시에 테이퍼 공구를 사용하여 선직면(ruled surface)을 플랭크 가공하는 경우에 효율적으로 오차를 추정하고, 추정된 오차를 목적함수로 정의한 다음 목적함수의 1차 미분값으로 학습 변수들을 수정해 가공 경로에 대한 과삭 및 미삭 비율을 조절하여 기계학습에 사용되는 경사 하강(gradient descent) 기법으로 최적화 된 가공 경로를 생성할 수 있도록 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법 및 시스템을 제공함에 있다.

과제의 해결 수단

[0010] 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 일 측면에 따르면, 각 블레이드의 선직면(S)과, 각 선직면 상의 상단 커브 및 하단 커브를 이용하여 가공 경로를 공구축 좌표[T(i)=(p(i),a(i))]의 집합으로 정의하고, 상기 상단 커브 및 하단 커브에 대해 내분하여 생성한 내분 커브의 i번째 구간과 공구 간의 오차(e_{ki}) 및 전체 내분 커브(m_i)에 대한 공구의 오차(e_k)를 산출하는 오차 산출부; 상기 공구축과 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출하는 특징점 산출부; 및 상기 공구축 좌표의 인자(p_i, a_i)를 학습변수(θ=(p_i, a_i))로 하는 목적함수(E_i(θ=(p_i, a_i)))를 설정하여 편미분하고, 상기 학습변수를 갱신하여 가공경로를 생성하는 가공경로 생성부를 포함하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템이 제공된다.

[0011] 또한, 상기 공구축은 k 시점에서 공구 끝점의 좌표(p(k))와 공구축의 방향(a(k))에 따라 직선 p(k)+h · a(k) 상에 위치하고, 공구의 테이퍼 각도가 φ 이고, h₀ 위치에서의 공구 반경이 r₀ 인 경우, h 위치에서의 공구 반경은 r(h)=r₀+(h-h₀)tanφ 일 수 있다.

[0012] 또한, 상기 공구의 테이퍼 각도와, 공구 반경, 공구축 및 내분 커브의 i번째 구간 사이의 최단거리를 이용하고, 상기 공구 반경은 r(h_{ki})=r₀+h_{ki}tanφ 일 수 있다.

[0013] 또한, 상기 가공경로 생성부는, 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 0보다 크면 미삭, 0보다 작으면 과삭으로 인식하게 된다.

[0014] 그리고, 상기 과삭을 미삭보다 줄여야 하는 경우, f_{overcut}의 값을 f_{undercut}보다 크게 설정하면, 상기 과삭에 대해서 상기 미삭보다 f_{overcut}/f_{undercut} 배만큼 변경이 가능하다.

[0015] 한편, 전술한 목적을 달성하기 위한 본 발명의 다른 측면에 따르면, (a) 각 블레이드의 선직면(S)과, 각 선직면 상의 상단 커브 및 하단 커브를 이용하여 가공 경로를 공구축 좌표[T(k)=(p(k),a(k))]의 집합으로 정의하는 단계; (b) 상기 상단 커브 및 하단 커브에 대해 내분하여 생성한 내분 커브의 i번째 구간과 공구 간의 오차(e_{ki}) 및 전체 내분 커브(m_i)에 대한 공구의 오차(e_k)를 산출하는 단계;

$$e_{ki} = d_{ki} - r(h_{ki}), e_k = \min_i e_{ki}$$

(c) 상기 공구축과 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출하는 단계;

차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출하는 단계;

(d) 상기 공구축 좌표의 인

자(p_i, a_i)를 학습변수($\Theta=(p_i, a_i)$)로 하는 목적함수($E_i(\Theta=(p_i, a_i))$)를 설정하여 편미분하는 단계; 및 (e) 상기 학습변수를 다음 수학식에 따라 갱신하여 가공경로를 생성하는 단계를 포함하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법

$$\theta_{new} = \theta_{old} - \eta \frac{\partial E}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_{old}}$$

법에 제공된다. 여기서, η 는 학습계수(Learning rate)를 나타낸다.

[0016] 또한, 상기 (a) 단계에서, k 시점에서 공구 끝점의 좌표($p(k)$)와 공구축의 방향($a(k)$)에 따라 공구축은 직선 $p(k)+h \cdot a(k)$ 상에 위치하게 된다.

[0017] 또한, 상기 (a) 단계에서, 공구의 테이퍼 각도가 ϕ 이고, h_0 위치에서의 공구 반경이 r_0 인 경우, h 위치에서의 공구 반경은 $r(h)=r_0+(h-h_0)\tan\phi$ 일 수 있다.

[0018] 또한, 상기 (a) 단계에서, 다음 수학식에 따른 임의의 내분 커브($[m_i(\lambda)]_{i=1..n}$)의 각 점들은 항상 각 블레이드의 선직면(S) 상에 위치하게 된다.

[0019] 또한, 상기 (b) 단계는, 공구의 테이퍼 각도와, 공구 반경, 공구축 및 내분 커브의 i번째 구간 사이의 최단거리를 이용하고, 상기 공구 반경은 $r(h_{ki})=r_0+h_{ki}\tan\phi$ 일 수 있다.

[0020] 또한, 상기 (b) 단계에서, 상기 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 0보다 크면 미삭, 0보다 작으면 과삭으로 인식하게 된다.

[0021] 그리고, 상기 과삭을 미삭보다 줄여야 하는 경우, $f_{overcut}$ 의 값을 $f_{undercut}$ 보다 크게 설정하면, 상기 과삭에 대해서 상기 미삭보다 $f_{overcut}/f_{undercut}$ 배만큼 변경이 가능하다.

발명의 효과

[0022] 본 발명에 의하면, 테이퍼 공구를 사용하여 임펠러를 가공하는 경우에 공구와 선직면 간의 오차를 추정하여 그 오차를 최소화하고, 경사 하강(GD) 기법에 따라 과삭과 미삭 비율을 조절해 최적화 된 가공경로를 생성할 수 있다.

[0023] 또한, 가공 오차를 최소화 함으로써 임의의 시점에서 공구의 옆면이 블레이드 면에 최대한 밀착되도록 가공할 수 있고, 공구가 후진하는 일 없이 가능한 일정한 속도로 진행하여 표면조도를 향상시킬 수 있다.

[0024] 그리고, 문제를 최대한 단순화하고 이를 목적함수로 정의한 다음, 목적함수의 1차 미분값으로 학습변수들을 수정하여 과삭과 미삭을 조절하는 등의 제약조건을 쉽게 적용할 수 있는 장점을 가진다.

도면의 간단한 설명

[0025] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템의 주요 기능 블록을 나타낸 구성도이다.

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 가공 경로 오차 관련 표기 예를 나타낸 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법을 설명하기 위한 동작 흐름도를 나타낸 도면이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따라 생성한 가공경로의 예를 나타낸 도면이다.

도 5는 본 발명의 실시예에 따른 과삭과 미삭을 조절하는 화면 예를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0026] 본 발명은 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시예를 가질 수 있는 바, 특정 실시예들을 도면에 예시하고 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 특정한 실시형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명

의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

- [0027] 본 발명에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법 및 시스템의 실시예를 첨부도면을 참조하여 상세히 설명하기로 한다. 첨부도면을 참조하여 설명함에 있어 동일하거나 대응하는 구성 요소는 동일한 도면번호를 부여하고 이에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.
- [0028] 임펠러의 기계 가공 단계는 크게 황삭(Rough cut machining or roughing)과 정삭(Finish cut machining or finishing)으로 구분된다.
- [0029] 황삭은 초기 단계의 원소재(Raw stock)에서 최종 제품(혹은 부품)에 필요하지 않는 대부분의 재료를 가능한 한 빠르게 제거하는 작업이고, 정삭은 황삭이 이루어진 후, 제품의 최종 형상에 필요한 부분을 제외한 모든 소재를 제거하는 작업을 가리킨다.
- [0030] 그런데, 대부분의 기계 가공의 경우, 약 60% 이상의 가공시간이 황삭 단계에서 소요된다. 따라서 NC 가공이 포함된 전체 작업공정의 공수를 줄이고 작업장의 생산성을 늘이기 위해서는 경제적인 황삭가공 공정계획이 대단히 중요하다.
- [0031] 임펠러 가공의 경우 허브축 상에 많은 수의 블레이드(날개)를 달고 있다. 회전형의 허브축은 먼저 선삭(Turning)을 거쳐 임펠러 외형 윤곽을 갖춘 뒤에 블레이드 면(Blade surface)의 가공을 위해 밀링(Milling) 기계로 이동한다.
- [0032] 날개 블레이드는 기하학적인 측면으로 볼 때, 선직면(Ruled surface)으로 이루어져 있으나 휘어져 있고(Twisted) 중간 부분에 변곡이 발생한다. 블레이드와 블레이드 사이의 간격이 상당히 좁아 경우에 따라서는 몇 개의 공구를 사용하여 5축 가공을 하여야 한다.
- [0033] 본 발명에서는 5축 가공 시에 선직면으로 이루어진 블레이드에 대해 테이퍼 공구를 사용해 플랭크 가공을 경사하강(gradient descent) 기법으로 과삭 및 미삭 비율을 조절하여 플랭크 정삭 가공 경로를 최적화 하는 예를 설명한다.
- [0034] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템의 주요 기능 블록을 나타낸 구성도이다.
- [0035] 도 1을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템(100)은, 오차 산출부(110)와 특징점 산출부(120) 및 가공경로 생성부(130)를 포함한다.
- [0036] 가공에 대한 평가에는 조도, 속도, 공구 부하 등 다양한 기준이 있지만, 가장 기본적이고 중요한 평가는 역시 오차 계산이다. 그리고 실제 가공물에 대한 평가가 가장 직접적이겠으나, 가공 이전에 가공 경로를 평가하는 작업을 진행할 수 있다면 반복되는 테스트 가공과 측정에 소모되는 비용과 시간을 크게 절약할 수 있다. 허용 오차를 초과하는지, 어느 부분에서 얼마나 초과하는지를 미리 확인함으로써, 효율적으로 공구 경로를 개선할 수 있다.
- [0037] 오차 산출부(110)는 각 블레이드의 선직면(S)과, 각 선직면 상의 상단 커브 및 하단 커브를 이용하여 가공 경로를 공구축 좌표[T(i)=(p(i),a(i))]의 집합으로 정의하고, 도 2에 도시된 바와 같이 상단 커브 및 하단 커브에 대해 내분하여 생성한 내분 커브의 i번째 구간과 공구 간의 오차(e_{ki}) 및 전체 내분 커브(m_i)에 대한 공구의 오차(e_k)를 산출하게 된다. 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 가공 경로 오차 관련 표기 예를 나타낸 도면이다.
- [0038] 도 2에서, 블레이드 면 S는 선직면(ruled surface)이고, 면의 상단 커브 [U_i]_{i=1...N}와 하단 커브 [V_i]_{i=1...N}가 주어졌다고 가정하면, 이 상/하단 커브는 각각 N개의 점들로 이루어진 polyline으로 근사할 수 있으며, 상/하단 커브의 i번째 점끼리 이은 선은 항상 S의 위에 있다. ($\overline{U_i V_i} \subset S$)
- [0039] 따라서 아래 수학적식1에 의해 생성되는 임의의 내분 커브 ([m_i(λ)]_{i=1...N})의 각 점들은 항상 S의 위에 있다.

수학식 1

$$m_i(\lambda) = (1-\lambda)u_i + \lambda v_i, 0 \leq \lambda \leq 1$$

[0040]

[0041] 또한, 가공 경로를 공구축 좌표 $T(k)=(p(k), a(k))$ 의 집합으로 정의한다. $p(k)$ 는 k 시점에서 공구 끝점의 좌표, $a(k)$ 는 공구축의 방향이므로 공구축은 직선 $p(k)+ta(k)$ 상에 위치한다. 그리고 공구의 테이퍼 각도가 ϕ 인 경우, h_0 위치에서의 공구 반경이 r_0 라면, h 위치에서의 공구 반경($r(h)$)은 다음 수학식2와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$r(h) = r_0 + (h - h_0)\tan\phi$$

[0042]

[0043] 도 2에서, 공구축과 내분 커브의 i 번째 구간 $\overline{m_i m_{i+1}}$ 사이의 최단 거리는 $d_{ki} = \|q_{ki} - c_{ki}\|$ 이다.

또한 $h_{ki} = \|q_{ki} - c_{ki}\|$ 이므로 해당 위치에서의 공구 반지름은 $r(h_{ki}) = r_0 + h_{ki}\tan\phi$

이다. 이때 q_{ki} 와 c_{ki} 는 두 직선의 최단 거리를 계산하는 방법으로 손쉽게 구할 수 있다. 그리하여 다

음 수학식3에 따라 $\overline{m_i m_{i+1}}$ 구간과 공구와의 오차를 e_{ki} 로, 전체 내분 커브 $[m_i(\lambda)]$ 에 대한 공구의 오차는 e_k 로 정의한다.

수학식 3

$$e_{ki} = d_{ki} - r(h_{ki}), e_k = \min_i e_{ki}$$

[0044]

[0045] 이때 e_k 가 0보다 크면 미삭, 0보다 작으면 과삭을 의미한다.

[0046] 종합하면 필요한 정확도에 따라 상/하단 커브를 polyline으로 근사하고, 적당한 λ 로 내분 커브들을 생성하여, 가공 경로의 공구 위치마다 내분 커브와의 오차를 구하여 가공 경로의 오차를 추정한다. 일반적으로 $\lambda = \{0, 0.5, 1\}$, 즉 주어진 상/하단 커브와 중간 커브를 사용하는 것이 적당하다.

[0047] 가공 경로 생성은 여러 조건들을 최대한 만족시키는 과정이다. 미삭/과삭의 최소화, 표면 조도의 향상은 기본이며 공구 마모나 가공 시간의 최소화 등 상황에 따라 다양한 조건들이 추가될 수 있다. 그러므로 이러한 조건들을 고려할 수 있는 가공 경로 생성 기법이 필요하다.

[0048] 경사 하강(Gradient descent : 이하 GD) 기법은 가장 일반적인 비선형 최적화 기법 중에 하나로, 주어진 목적 함수(Target function)의 가파른 방향으로 학습 변수(Learning parameter)들을 조금씩 변화시켜 목표 함수의 최대 또는 최소값을 출력하는 학습 변수 값을 찾아간다.

[0049] 일반적인 GD 기법의 적용방법은 아래와 같다.

[0050] 1) 목표 함수 $E(\theta)$ 를 정의한다. 여기서 θ 는 학습 변수들을 뜻한다.

[0051] 2) $\partial E / \partial \theta$ 를 유도한다.

[0052] 3) 현재 학습 변수 값 θ_{old} 에 대한 $\partial E / \partial \theta$ 값을 계산한다.

[0053] 4) 다음 수학적식에 따라 학습 변수를 수정한다.

수학적식 4

[0054]
$$\theta_{new} = \theta_{old} - \eta \frac{\partial E}{\partial \theta} \Big|_{\theta = \theta_{old}}$$

[0055] 여기서, η 는 학습계수(Learning rate)를 나타내고, 학습 속도와 정밀도를 조절한다.

[0056] 정지 조건을 만족할 때까지 3, 4를 반복한다. 정지 조건은 보통 최대 반복 횟수나 오차가 목표 값에 도달했는지 여부로 결정한다.

[0057] 이와 같은 GD 기법은 목표 함수가 1차 미분만 가능하다면 적용할 수 있으므로 활용 폭이 넓고, 구현하기 용이하며, 다양한 제약 조건들을 목표함수에 포함시켜 학습의 방향을 조정하는 것도 가능하다.

[0058] 그러나, 학습 속도가 느리고, 적절한 학습 계수 값을 설정해주어야 한다. 만약 학습 계수가 너무 작으면 학습 시간이 불필요하게 길어지고, 너무 크면 최적값에 수렴하지 않고 발산하는 현상이 발생한다. 이런 점 때문에 1차 미분 정보만을 사용하는 GD 기법보다 2차 미분 정보까지 활용하는 Newton 기법, 그리고 2차 미분이 어려운 경우 이를 근사하는 quasi-Newton 계열의 기법들이 활발히 연구 및 적용되고 있다.

[0059] 하지만 이런 단점에도 불구하고 많은 분야와 기법들에서 GD가 적용되고 있는데, 그 중에서 대표적인 것이 최근 가장 주목 받는 기계학습 기법 중 하나인 Deep Belief Networks(DBN)이다. 신경망(Neural Networks) 모델의 일종인 DBN은 강력한 성능과 확장성으로 인해 각광받고 있으며, 현재 구글에서 집중 투자하고 있는 분야 중 하나이다. DBN의 경우 내부적인 무작위성 때문에 GD 계열의 최적화 기법을 주로 사용한다.

[0060] 플랭크 가공 시 가공 경로는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

[0061] 우선 임의의 시점 k 에서 공구의 옆면이 블레이드 면에 최대한 밀착되어 오차를 최소화하고, 공구가 후진하는 일 없이 가능한 일정한 속도로 진행하여 표면조도를 향상시켜야 한다. 이 조건을 만족하기 위해 아래와 같이 최적화 문제를 단순화 하였다.

[0062] 블레이드 면 S 는 선직면(ruled surface)이고, 주어진 상단 커브 $[U_i]_{i=1..N}$ 와 하단 커브 $[V_i]_{i=1..N}$ 로부터 중단 커브 $[m_i(\lambda=0.5)=(u_i+v_i)/2]_{i=1..N}$ 를 계산할 수 있다. 블레이드 면에 공구를 밀착시키는 대신, 이 상/중/하단 polyline 커브와의 오차를 최소화한다.

[0063] Polyline 커브 $[m_i]$ 과 공구축 $T(k)$ 의 오차를 최소화하는 간단한 방법은 우선 $[m_i]$ 을 대신하는 특징점 c_k 를 구하고 공구축과 특징점 사이의 오차를 줄이는 과정을 반복하는 것이다. 이 경우 특징점은 공구축과 커브의 오차 e_k 가 최소가 되는 점으로 정한다.

[0064] 특징점 산출부(120)는 공구축과 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출한다.

$$c_k = \arg \min_{ck} e_k$$

[0065] 일정 속도로 공구가 전진하는 가공 경로를 구하기 위해, 가공 경로를 N 개의 공구축 좌표 $T_i=(p_i, a_i)$ 의 집합으로 정의하고, i 번째 공구축 좌표 T_i 는 커브의 i 번째 점 m_i 와의 오차를 최소화하도록 한다. 이를 위해 상/중/하단 커브 중에서 하나를 정해서 특징점을 $c_k=m_i$ 로 한다.

[0066] 가공경로 생성부(130)는 공구축 좌표의 인자(p_i, a_i)를 학습변수($\Theta=(p_i, a_i)$)로 하는 목적함수($E_i(\Theta=(p_i, a_i))$)를 설정하여 편미분하고, 정치조건을 만족할 때까지 학습변수를 갱신하여 가공경로를 생성하게 된다.

[0067] 또한, 가공경로 생성부는, 과삭을 미삭보다 줄여야 하는 경우, $f_{overcut}$ 의 값을 $f_{undercut}$ 보다 크게 설정하면, 과삭에 대해서 미삭보다 $f_{overcut}/f_{undercut}$ 배만큼 변경이 가능하다.

[0068] 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법을 설명하기 위한 동작 흐름도를 나타낸 도면이다.

[0069] 도 3을 참조하면, 본 발명의 실시예에 따른 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템(100)은, 오차 산출부(110)가 각 블레이드의 선직면(S)과, 각 선직면 상의 상단 커브 및 하단 커브를 이용하여 가공 경로를 공구축 좌표 [$T(k)=(p(k), a(k))$]의 집합으로 정의한다(S310).

[0070] 여기서, k 시점에서 공구 끝점의 좌표($p(k)$)와 공구축의 방향($a(k)$)에 따라 공구축은 직선 $p(k)+h \cdot a(k)$ 상에 위치하게 된다. 또한, 공구의 테이퍼 각도가 ϕ 이고, h_0 위치에서의 공구 반경이 r_0 인 경우, h 위치에서의 공구 반경은 $r(h)=r_0+(h-h_0)\tan\phi$ 일 수 있다. 그리고, 수학식1에 따른 임의의 내분 커브($[m_i(\lambda)]_{i=1...N}$)의 각 점들은 항상 각 블레이드의 선직면(S) 상에 위치하게 된다.

[0071] 이어, 오차 산출부(110)는 상단 커브 및 하단 커브에 대해 내분하여 생성한 내분 커브의 i번째 구간과 공구 간의 오차(e_{ki}) 및 전체 내분 커브(m_i)에 대한 공구의 오차(e_k)를 산출한다(S320).

[0072] 여기서, 공구의 테이퍼 각도와, 공구 반경, 공구축 및 내분 커브의 i번째 구간 사이의 최단거리를 이용하고, 공구 반경은 $r(h_{ki})=r_0+h_{ki}\tan\phi$ 일 수 있다.

[0073] 이어, 특징점 산출부(120)는 공구축과 전체 내분 커브에 대한 공구의 오차(e_k)가 최소가 되는 특징점(c_k)을 산출한다(S330).

[0074] 여기서, 최적 가공경로와 최적 공구축 좌표, 목적 함수 등을 다음과 같이 정의할 수 있다.

[0075] - 최적 가공경로 : $\{\mathbf{T}_i\}_{opt} = \{\mathbf{T}_i^{opt}\}$

[0076] - 최적 공구축 좌표 : $\mathbf{T}_i^{opt} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{T}_i} E_i(\mathbf{T}_i)$

[0077] - 공구축 좌표 : $\mathbf{T}_i = (p_i, a_i), \|a_i\| = 1$

[0078] - 목적 함수 : $E_i(\theta = (p_i, a_i)) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 e_{ij}^2$

[0079] - i번째 공구축 좌표와 j번째 커브와의 오차 : $e_{ij} = d_{ij} - r(h_{ij})$

[0080] - i번째 공구축에 대한 j번째 커브의 특징점 c_{ij} 와 i번째 공구축 간의 거리 : $d_{ij} = \|c_{ij} - q_{ij}\|$, 단 $a_i \cdot (c_{ij} - q_{ij}) = 0$

[0081] - 공구 반경 : $r(h_{ij}) = r_0 + h_{ij} \tan \phi, h_{ij} = a_i \cdot (c_{ij} - p_i)$

[0082] - 공구의 테이퍼 각도 : ϕ

[0083] 이어, 가공경로 생성부(130)는 공구축 좌표의 인자(p_i, a_i)를 학습변수($\Theta=(p_i, a_i)$)로 하는 목적함수($E_i(\Theta$

$(\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i)$ 를 설정하여 편미분한다(S340).

[0084]

즉, 목적함수를 학습변수 $\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i)$ 들에 대해 다음 수학식5에 따라 GD 기법으로 최적화 한다.

수학식 5

$$E_i(\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i)) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (d_{\bar{j}} - r(h_{\bar{j}}))^2$$

$$r(h_{\bar{j}}) = r_0 + h_{\bar{j}} \tan \varphi$$

$$d_{\bar{j}} = \|\mathbf{c}_{\bar{j}} - \mathbf{q}_{\bar{j}}\| = \sqrt{\|\mathbf{c}_{\bar{j}} - \mathbf{p}_i\|^2 - h_{\bar{j}}^2}$$

[0085]

$$h_{\bar{j}} = \mathbf{a}_i \cdot (\mathbf{c}_{\bar{j}} - \mathbf{p}_i)$$

[0086]

목적함수의 편미분은 다음 수학식6과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 6

$$\frac{\partial E_i}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \sum_{j=1}^3 (r(h_{\bar{j}}) - d_{\bar{j}}) \left(\frac{\partial r(h_{\bar{j}})}{\partial \boldsymbol{\theta}} - \frac{\partial d_{\bar{j}}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right)$$

$$\frac{\partial r(h_{\bar{j}})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \frac{\partial h_{\bar{j}}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \tan \varphi$$

$$\frac{\partial d_{\bar{j}}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \frac{1}{d_{\bar{j}}} \left\{ (\mathbf{c}_{\bar{j}} - \mathbf{p}_i) \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{\theta}} (\mathbf{c}_{\bar{j}} - \mathbf{p}_i) - h_{\bar{j}} \frac{\partial h_{\bar{j}}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right\}$$

[0087]

[0088]

여기서, $k=\{x,y,z\}$ 일 때, 각 학습 변수 별로 더 상세하게 풀어보면 다음 수학식 7과 같다.

수학식 7

$$\frac{\partial h_{\bar{j}}}{\partial a_k} = (c_{\bar{j}k} - p_k) - h_{\bar{j}} a_k$$

$$\frac{\partial h_{\bar{j}}}{\partial p_k} = -a_k$$

$$\frac{\partial d_{\bar{j}}}{\partial a_k} = \frac{-h_{\bar{j}}}{d_{\bar{j}}} \{ (c_{\bar{j}k} - p_k) - h_{\bar{j}} a_k \}$$

$$\frac{\partial d_{\bar{j}}}{\partial p_k} = \frac{-1}{d_{\bar{j}}} (c_{\bar{j}k} - q_{\bar{j}k})$$

$$\therefore \frac{\partial E_i}{\partial \mathbf{a}_i} = - \sum_{j=1}^3 \left(\frac{h_{\bar{j}}}{d_{\bar{j}}} + \tan \varphi \right) (\mathbf{c}_{\bar{j}} - \mathbf{q}_{\bar{j}})$$

[0089]

$$\frac{\partial E_i}{\partial \mathbf{p}_i} = - \sum_{j=1}^3 \frac{1}{d_{\bar{j}}} (\mathbf{c}_{\bar{j}} - \mathbf{q}_{\bar{j}}) - \mathbf{a}_i \tan \varphi$$

[0090]

이어, 가공경로 생성부(130)는 학습변수를 수학식4에 따라 갱신하여 도 4에 도시된 바와 같은 가공경로를 생성

한다(S350).

[0091] 즉, 전술한 수학식들을 사용하여 가공경로의 최적화를 실행하는 것으로서, 공구축 좌표 T_1 를 초기화하고, 커브들에서 각각 특징점 c_{ij} 를 추출하며, 목적 함수의 편미분 $\frac{\partial E}{\partial \theta}|_{\theta=\theta_{old}}$ 을 계산하고, 수학식4에 따라 학습 변수를 갱신하여 도 4에 도시된 바와 같이 최적의 가공경로를 생성하는 것이다. 도 4는 본 발명의 실시예에 따라 생성한 가공경로의 예를 나타낸 도면이다.

[0092] 최적화된 가공 경로는 미삭량과 과삭량이 비슷한 결과를 보인다. 하지만, 실제 가공 현장에서 과삭에는 미삭보다 훨씬 엄격한 기준이 적용된다. 따라서 도 5에 도시된 바와 같이 미삭량이 어느 정도 증가하는 것을 감수하고 과삭량을 줄일 수 있다. 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 과삭과 미삭을 조절하는 화면 예를 나타낸 도면이다. GD를 사용해 최적화하는 경우에는 목표함수를 다음 수학식8과 같이 변경하여 간단히 적용할 수 있다.

수학식 8

$$E'_i(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 F(e_{ij}) e_{ij}^2$$

$$F(e_{ij}) = \begin{cases} f_{undercut} & , e_{ij} \geq 0 \\ f_{overcut} & , e_{ij} < 0 \end{cases}$$

$$\therefore \frac{\partial E'_i}{\partial \theta} = F(e_{ij}) \frac{\partial E_i}{\partial \theta}$$

[0093]

[0094] 과삭을 미삭보다 줄여야 할 때, $f_{overcut}$ 의 값을 $f_{undercut}$ 보다 크게 설정하면, 과삭에 대해서는 미삭보다 $f_{overcut}/f_{undercut}$ 배만큼 더 많이 변경하게 되어, 과삭이 줄어드는 결과를 얻을 수 있다. 하지만, 이 경우 $f_{overcut}, f_{undercut}$ 값만큼 학습계수 η 가 증폭되는 효과가 있으므로, 학습이 발산하지 않도록 주의해야 한다.

[0095] 전술한 바와 같이 본 발명에 의하면, 임펠러의 가공 시에 테이퍼 공구를 사용하여 선직면(ruled surface)을 플랭크 가공하는 경우에 효율적으로 오차를 추정하고, 추정된 오차를 목적함수로 정의한 다음 목적함수의 1차 미분값으로 학습 변수들을 수정해 가공 경로에 대한 과삭 및 미삭 비율을 조절하여 기계학습에 사용되는 경사 하강(gradient descent) 기법으로 최적화 된 가공 경로를 생성할 수 있도록 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법 및 시스템을 실현할 수 있다.

[0096] 본 발명이 속하는 기술분야의 당업자는 본 발명이 그 기술적 사상이나 필수적 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 실시될 수 있으므로, 이상에서 기술한 실시예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적인 것이 아닌 것으로서 이해해야만 한다. 본 발명의 범위는 상기 상세한 설명보다는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 등가개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

산업상 이용가능성

[0097] 본 발명은 임펠러의 가공 시에 테이퍼 공구를 사용하여 선직면(ruled surface)을 플랭크 가공하는 경우에 효율적으로 오차를 추정하고, 추정된 오차를 목적함수로 정의한 다음 목적함수의 1차 미분값으로 학습 변수들을 수정해 가공 경로에 대한 다양한 가공 조건을 조절하여 경사 하강(gradient descent) 기법으로 최적화 된 가공 경로를 생성할 수 있도록 하는 플랭크 정삭 가공경로 생성 방법 및 시스템에 적용할 수 있다.

부호의 설명

[0098]

100 : 플랭크 정삭 가공경로 생성 시스템

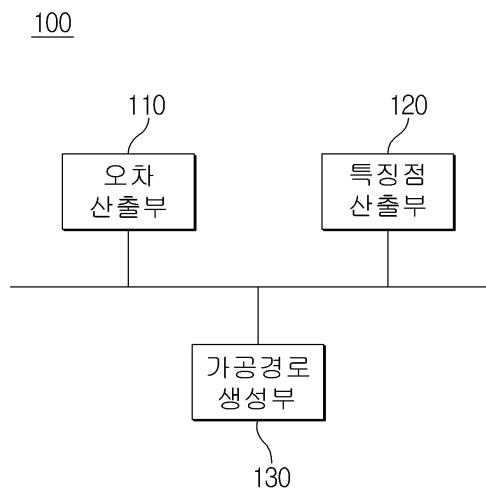
110 : 오차 산출부

120 : 특징점 산출부

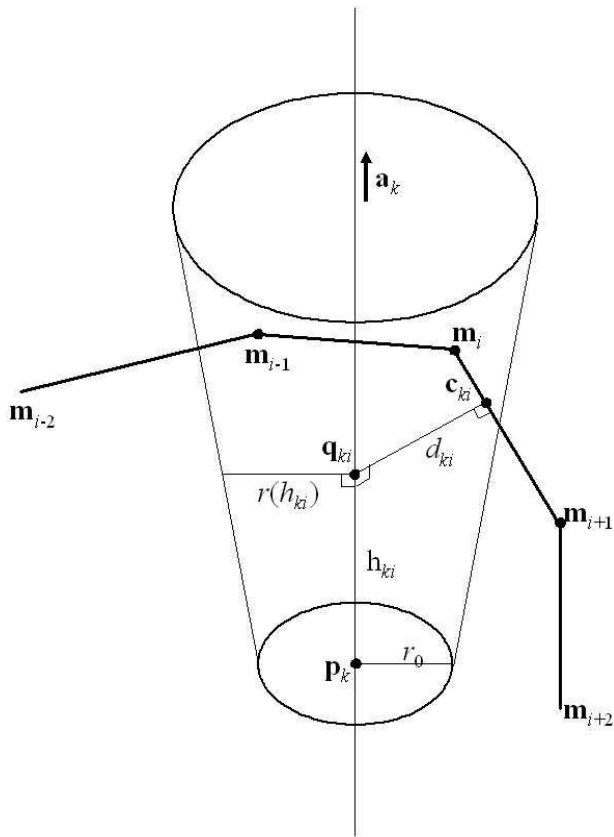
130 : 가공경로 생성부

도면

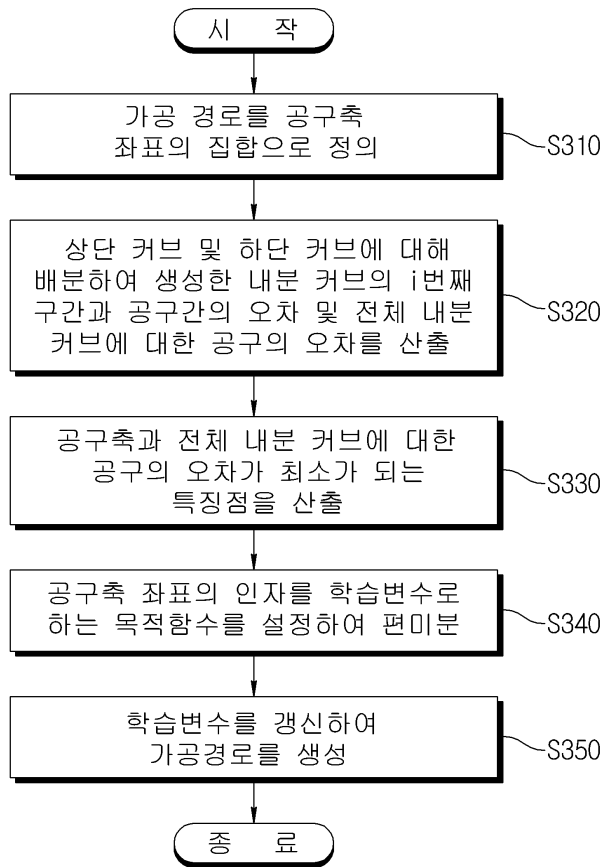
도면1



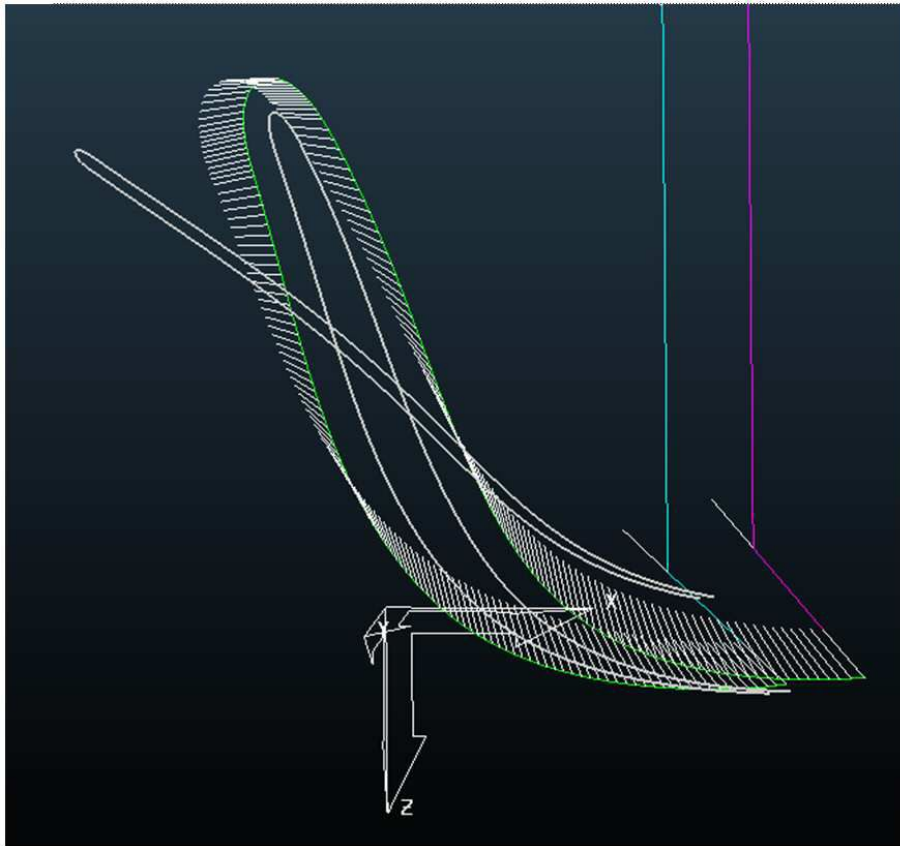
도면2



도면3



도면4



도면5

Blade Wire Frame Swarf Toolpath Generator

PM Command: Execute

Load Active Workplane: 1ST

Load Active Tool: B2TPS

Wires: Refresh Pattern List, Select Last Patterns

Hub Pattern: Hub_Curve

Blade Patterns:

Top Left	Blade_1	Bottom Left	Blade_4
Center	Blade_2	Center	Blade_5
Right	Blade_3	Right	Blade_6

Hub Wire

idx	T	X	Y
0	4.38499221890981	-2.395561	
1	4.38589994010228	-2.396051	
2	4.38664527880753	-2.396448	
3	4.38722823502557	-2.396766	
4	4.38764880875639	-2.396985	
5	4.387907	-2.397125	
6	4.388084	-2.397221	
7	4.38818	-2.397274	
8	4.388204	-2.397287	
9	4.388165	-2.397265	
10	4.388072	-2.397211	

Upper Wire

idx	T	X	Y
0	11.4312622708489	-17.49474	
1	11.1956091506124	-17.43096	
2	10.9617673634092	-17.36436	
3	10.7297369092395	-17.29470	
4	10.499517788103	-17.22211	
5	10.27111	-17.14671	
6	10.0436078784136	-17.06976	
7	9.81643782849219	-16.99120	
8	9.58983109782262	-16.91104	
9	9.3659427153036	-16.83020	
10	9.14302881359351	-16.74811	

Lower Wire

idx	T	X	Y
0	13.4720783770485	-16.0844	
1	13.182872561311	-16.07907	
2	12.8950858157375	-16.06494	
3	12.6087181403278	-16.04201	
4	12.3237695350819	-16.01020	
5	12.04024	-15.96975	
6	11.75742	-15.92481	
7	11.4746	-15.87536	
8	11.19211	-15.82115	
9	10.91269	-15.76272	
10	10.63428	-15.6994	

Load Patterns As Wires

ShowInPowerMILL:

PolygonizeTolerance: 0.001

PolygonizeTolerance_Edge: 0.001

SmoothRange_Left: 0

SmoothRange_Right: 0

OK Cancel

92 126

Optimize Toolpath

LearningRate: 0.001

ToleranceOverCut: 0

FactorUnderCut: 1

FactorOverCut: 10

ConsiderationRange: 10

OK Cancel