(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구
국제사무국

(43) 국제공개일
2023 년 4 월 6 일 (06.04.2023)

WIPO | PCT

(10) 국제공개번호
WO 2023/054751 A1

(51) 국제특허분류:
B25J 9/16 (2006.01) *B25J 19/02* (2006.01)
B25J 11/00 (2006.01) *B23Q 17/22* (2006.01)
B25J 9/06 (2006.01) *G05B 19/19* (2006.01)
B25J 13/08 (2006.01) *G05B 19/402* (2006.01)

(21) 국제출원번호: PCT/KR2021/013384

(22) 국제출원일: 2021 년 9 월 29 일 (29.09.2021)

(25) 출원언어: 한국어

(26) 공개언어: 한국어

(30) 우선권정보:
10-2021-0128099 2021 년 9 월 28 일 (28.09.2021) KR
10-2021-0128490 2021 년 9 월 29 일 (29.09.2021) KR

(71) 출원인: 한국생산기술연구원 (**KOREA INSTITUTE OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY**) [KR/KR]; 31056 충청남도 천안시 서북구 입장면 양대기로길 89, Chungcheongnam-do (KR).

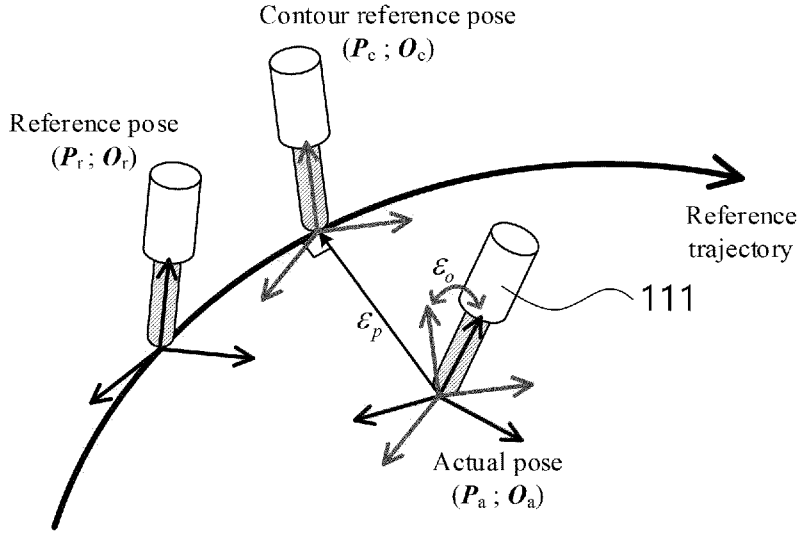
(72) 발명자: 김성현 (**KIM, Seong Hyeon**); 07019 서울시 동작구 사당로16다길 57, 2동 606호., Seoul (KR). 남정수 (**NAM, Jung Soo**); 13555 경기도 성남시 분당구 성남대로 393, 7층 A716호., Gyeonggi-do (KR). 김태곤 (**KIM, Tae Gon**); 13588 경기도 성남시 분당구 중앙공원로 53 114동 1102호., Gyeonggi-do (KR). 이석우 (**LEE, Seok Woo**); 13589 경기도 성남시 분당구 중앙공원로 20 408동 1104호, Gyeonggi-do (KR). 신강우 (**SHIN, Kang U**); 31097 충청남도 천안시 서북구 한들3로 35-23, 205동 1504호., Chungcheongnam-do (KR).

(74) 대리인: 한상수 (**HAN, Sang Soo**); 06721 서울시 서초구 효령로 60길 13, 6층, Seoul (KR).

(81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT,

(54) **Title:** ROBOT CONTROL METHOD USING CONTOUR CONTROL ALGORITHM

(54) **발명의 명칭:** 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법



(57) **Abstract:** One embodiment of the present invention provides a technique for controlling, during processing using a robot, the robot so as to facilitate error correction of a processing path for an object to be processed. A robot control method using a contour control algorithm, according to an embodiment of the present invention, comprises: a first step of coupling a laser tracker to a robot so as to emit a laser beam at a processing unit having a tool, and thus measure actual position and actual direction, which are the real-time position and direction of the tool; a second step of dividing a reference processing path, which is a processing path of the tool previously set according to an object to be processed, into a plurality of straight lines and setting reference position and reference direction, which are the position and direction of the tool on the reference processing path; a third step of deriving a contour reference position, which is the position of the tool of which a position error has been corrected, by using two vertical connection lines vertically connecting the actual position to each of two straight lines passing through the closest reference position, which is the reference position closest to the actual position from among the plurality of straight lines; a fourth step of deriving a contour reference direction, which is the direction of the tool of which a direction error has been corrected, by using a reference direction at the closest reference position and the actual direction; and a fifth step of using the contour reference position and the contour reference direction so as to control the position and the direction of the tool, and thus control the robot.

WO 2023/054751 A1

[다음 쪽 계속]

AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) **지정국** (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

공개:

— 국제조사보고서와 함께 (조약 제21조(3))

(57) 요약서: 본 발명의 일 실시 예는 로봇을 이용한 가공 공정에서, 가공대상에 대한 가공경로의 오차 보정이 용이하게 수행되도록 로봇을 제어하는 기술을 제공한다. 본 발명의 실시 예에 따른 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법은, 레이저 트래커가 로봇에 결합되어 공구를 구비하는 가공부로 레이저를 조사하여 공구의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 측정하는 제1단계; 가공대상에 따라 사전에 설정된 공구의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할하고, 참조가공경로 상 공구의 위치와 방향인 참조위치와 참조방향을 설정하는 제2단계; 복수 개의 직선 중 실제위치에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치를 통과하는 2개의 직선 각각과 실제위치를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 공구의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치를 도출하는 제3단계; 최근접참조위치에서의 참조방향과 실제방향을 이용하여 공구의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향을 도출하는 제4단계; 및 윤곽기준위치와 윤곽기준방향을 이용하여 로봇을 제어함으로써 공구의 위치와 방향을 제어하는 제5단계;를 포함한다.

명세서

발명의 명칭: 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법

기술분야

[1] 본 발명은 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는, 로봇을 이용한 가공 공정에서, 가공대상에 대한 가공경로의 오차 보정이 용이하게 수행되도록 로봇을 제어하는 기술에 관한 것이다.

[2]

배경기술

[3] 최근에는 복수 개의 로봇을 이용한 제조 시스템이 증가하고 있으며, 자동차와 항공기 등과 같은 제품의 생산에 있어서, 로봇을 이용한 자동 제조 효율의 향상 및 가공 정밀도의 증가에 대한 요구가 지속적으로 증가하고 있다.

[4] 로봇을 이용하여 가공을 수행하는 경우, 로봇의 강성, 기구학 요인 등에 의해 가공오차가 발생하는데, 종래기술의 로봇 제어 장치에서는 상기와 같은 가공오차에 대한 정밀한 측정이 용이하지 않았으며, 이에 따라, 종래기술에서는 가공오차에 대한 정밀도를 향상시키기 위하여 복수 개의 센서를 이용하여 로봇의 가공에 대한 피드백을 수집하고 이와 같은 정보를 분석함으로써 로봇의 가공오차를 감소시키는 방식이 이용되었으나, 이와 같은 방식은 사용자가 개발한 제어 알고리즘을 적용할 수 있는 일부 개방형 로봇 제어기에만 적용할 수 있다는 문제점이 있다.

[5] 대한민국 공개특허 제10-2015-0070370호(발명의 명칭: 산업용 로봇의 인라인 교정을 위한 방법, 이러한 방법을 수행하기 위한 교정 시스템, 및 이러한 교정 시스템을 포함하는 산업용 로봇)에서는, 적어도 세 개의 광선들이 상기 로봇 팔(3)의 상기 말단(6)에 견고하게 연결된 적어도 하나의 광원(7)을 써서 생성되고, 상기 센서에 영향을 주는 광선의 위치를 2-차원 평면 내에 결정하기 위해 적응되는 적어도 하나의 광학 위치센서(12)는, 상기 로봇 팔(3)의 상기 말단(6)의 미리 정의된 교정 장소에서 상기 적어도 하나의 광원(7)에 의해 생성된 적어도 몇몇의 상기 광선들이 상기 센서(12) 또는 상기 센서들(12) 중 적어도 하나에 영향을 주도록 상기 로봇의 베이스부(2)에 대해 고정된 장소에 위치되는 사항이 개시되어 있다.

[6]

[7] <선행기술문헌>

[8] 대한민국 공개특허 제10-2015-0070370호

[9]

발명의 상세한 설명

기술적 과제

[10] 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 본 발명의 목적은, 로봇을 이용한 가공

공정에서, 가공대상에 대한 가공경로의 오차 보정이 용이하게 수행되도록 로봇을 제어하는 것이다.

[11] 그리고, 본 발명의 목적은, 추가적인 별도의 장치나 복잡한 연산을 최소화하면서도 로봇에 대한 상기와 같은 제어를 수행할 수 있도록 하는 것이다.

[12] 본 발명이 이루고자 하는 기술적 과제는 이상에서 언급한 기술적 과제로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

[13]

과제 해결 수단

[14] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 구성은, 레이저 트래커가 로봇에 결합되어 공구를 구비하는 가공부로 레이저를 조사하여 상기 공구의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 측정하는 제1단계; 가공대상에 따라 사전에 설정된 상기 공구의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할하고, 상기 참조가공경로 상 상기 공구의 위치와 방향인 참조위치와 참조방향을 설정하는 제2단계; 상기 복수 개의 직선 중 상기 실제위치에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치를 통과하는 2개의 직선 각각과 상기 실제위치를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 상기 공구의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치를 도출하는 제3단계; 상기 최근접참조위치에서의 상기 참조방향과 상기 실제방향을 이용하여 상기 공구의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향을 도출하는 제4단계; 및 상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향을 이용하여 상기 로봇을 제어함으로써 상기 공구의 위치와 방향을 제어하는 제5단계;를 포함한다.

[15] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제2단계에서, 상기 복수 개의 직선은 상기 참조가공경로가 보간기(interpolator)에 의해 분할되어 형성될 수 있다.

[16] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제3단계에서, 상기 2개의 직선은, 상기 최근접참조위치에 인접한 2개의 참조위치 각각과 상기 최근접참조위치를 연결하여 형성되는 제1연결직선 및 제2연결직선을 포함할 수 있다.

[17] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 실제위치로부터 상기 제1연결직선으로 연결되는 제1수직연결선과 상기 제1연결직선의 교점인 제1투영점 및, 상기 실제위치로부터 상기 제2연결직선으로 연결되는 제2수직연결선과 상기 제2연결직선의 교점인 제2투영점이 설정될 수 있다.

[18] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1연결직선과 상기 제2연결직선 각각에 대한 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 각각의 위치에 따라 상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향이 결정될 수 있다.

[19] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는

경우, 상기 최근접참조위치가 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[20] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제4단계에서, 상기 윤곽기준방향은, 상기 최근접참조위치에서의 참조방향일 수 있다.

[21] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제2투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[22] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[23] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 중 상기 실제위치에 더 근접한 투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[24] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제4단계에서, 상기 윤곽기준방향은, 상기 최근접참조위치에서의 참조방향과 상기 최근접참조위치에 인접한 참조위치에서의 참조방향를 이용한 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산으로 획득될 수 있다.

[25] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제4단계에서, 상기 윤곽기준방향은, 상기 윤곽기준위치에서 상기 공구의 길이 방향을 따라 형성되는 축의 벡터 방향일 수 있다.

[26] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1단계에서, 상기 가공부에 결합된 반사체의 위치에 대한 행렬에 균일변환행렬(HTM)을 곱하는 변환 행렬 곱셈을 통해 상기 공구의 실제위치가 측정될 수 있다.

[27] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명의 구성은, 복수 개의 링크와 복수 개의 관절을 구비하여 구동하는 로봇, 상기 로봇의 말단과 결합하고 공구를 구비하여 가공대상에 대한 가공을 수행하는 가공부 및, 상기 공구가 상기 가공대상에 대한 작업 시, 상기 로봇의 자세를 제어하는 제어부를 마련하는 제1단계; 상기 로봇의 자세에 따라 가변하는 상기 복수 개의 관절 각각에 대한 강성 값인 강성데이터와 상기 공구에 작용되는 힘인 절삭력에 대한 정보를 이용함으로써, 상기 공구에 대해 연산된 가공오차인 컴플라이언스오차를 연산하여 도출하는 제2단계; 가공대상에 따라 사전에 설정된 상기 공구의 가공경로인 참조가공경로 상 상기 공구의 위치 및 방향인 참조위치 및 참조방향, 그리고, 상기 컴플라이언스오차를 이용하여, 상기 공구의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 측정하는 제3단계; 가공대상에 따라 사전에 설정된 상기 공구의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할하는 제4단계; 상기 복수 개의 직선 중 상기 실제위치에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치를 통과하는 2개의 직선 각각과 상기 실제위치를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 상기 공구의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치를 도출하는

제5단계; 상기 최근접참조위치에서의 상기 참조방향과 상기 실제방향을 이용하여 상기 공구의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향을 도출하는 제6단계; 및 상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향을 이용하여 상기 로봇을 제어함으로써 상기 공구의 위치와 방향을 제어하는 제7단계;를 포함한다.

[28] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제2단계에서, 상기 컴플라이언스오차(Δx)는 하기의 수학식에 의해 도출되며, Δx는 컴플라이언스오차이고, C_x는 데카르트 컴플라이언스 행렬이며, Φ는 절삭력이고, C_0는 상기 로봇의 관절에 대한 컴플라이언스 행렬이며, T는 전치행렬일 수 있다.

[29] $$\Delta x = C_x \Phi = J C_\theta J^T \Phi$$

[30] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제4단계에서, 상기 복수 개의 직선은 상기 참조가공경로가 보간기(interpolator)에 의해 분할되어 형성될 수 있다.

[31] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제5단계에서, 상기 2개의 직선은, 상기 최근접참조위치에 인접한 2개의 참조위치 각각과 상기 최근접참조위치를 연결하여 형성되는 제1연결직선 및 제2연결직선을 포함할 수 있다.

[32] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 실제위치로부터 상기 제1연결직선으로 연결되는 제1수직연결선과 상기 제1연결직선의 교점인 제1투영점 및, 상기 실제위치로부터 상기 제2연결직선으로 연결되는 제2수직연결선과 상기 제2연결직선의 교점인 제2투영점이 설정될 수 있다.

[33] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1연결직선과 상기 제2연결직선 각각에 대한 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 각각의 위치에 따라 상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향이 결정될 수 있다.

[34] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 상기 최근접참조위치가 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[35] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제6단계에서, 상기 윤곽기준방향은, 상기 최근접참조위치에서의 참조방향일 수 있다.

[36] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제2투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[37] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[38] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 중 상기 실제위치에 더 근접한 투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정될 수 있다.

[39] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제6단계에서, 상기 윤곽기준방향은, 상기

최근접참조위치에서의 참조방향과 상기 최근접참조위치에 인접한 참조위치에서의 참조방향을 이용한 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산으로 획득될 수 있다.

[40] 본 발명의 실시 예에 있어서, 상기 제6단계에서, 상기 윤곽기준방향은, 상기 윤곽기준위치에서 상기 공구의 길이 방향을 따라 형성되는 축의 벡터 방향일 수 있다.

[41]

발명의 효과

[42] 상기와 같은 구성에 따른 본 발명의 효과는, 공구의 실제위치와 사전에 설정된 참조위치 간 차이를 이용하여 가공대상에 대한 가공경로의 오차 보정을 수행하므로, 오차 보정의 성능을 향상시킬 수 있다는 것이다.

[43] 그리고, 본 발명의 효과는, 추가적인 별도의 장치나 복잡한 연산을 최소화하면서도 로봇에 대한 오차 보정 제어를 수행할 수 있어, 로봇을 이용한 가공공정에서의 효율을 현저히 향상시킬 수 있다는 것이다.

[44] 본 발명의 효과는 상기한 효과로 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 상세한 설명 또는 특허청구범위에 기재된 발명의 구성으로부터 추론 가능한 모든 효과를 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[45]

도면의 간단한 설명

[46] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 공구의 위치 보정에 대한 모식도이다.

[47] 도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 공구의 위치 보정에 대한 그래프이다.

[48] 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 로봇 제어 장치에 대한 개략도이다.

[49] 도 4는 본 발명의 일 실시 예에 따른 윤곽기준위치를 측정하기 위한 각 케이스의 설명을 위한 이미지이다.

[50] 도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 방향윤곽오차의 측정에 대한 이미지이다.

[51] 도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 가공대상에 대한 설계도이다.

[52] 도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 로봇 제어 장치를 이용한 로봇 가공에 대한 이미지이다.

[53] 도 8은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 로봇 제어 장치에 대한 개략도이다.

[54] 도 9는 본 발명의 다른 실시 예에 따른 로봇 제어 장치의 일부에 대한 구성도이다.

[55]

발명의 실시를 위한 최선의 형태

[56] 본 발명에 따른 가장 바람직한 일 실시예는, 레이저 트래커가 로봇에 결합되어 공구를 구비하는 가공부로 레이저를 조사하여 상기 공구의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 측정하는 제1단계; 가공대상에 따라 사전에 설정된 상기 공구의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할하고,

상기 참조가공경로 상 상기 공구의 위치와 방향인 참조위치와 참조방향을 설정하는 제2단계; 상기 복수 개의 직선 중 상기 실제위치에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치를 통과하는 2개의 직선 각각과 상기 실제위치를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 상기 공구의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치를 도출하는 제3단계; 상기 최근접참조위치에서의 상기 참조방향과 상기 실제방향을 이용하여 상기 공구의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향을 도출하는 제4단계; 및 상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향을 이용하여 상기 로봇을 제어함으로써 상기 공구의 위치와 방향을 제어하는 제5단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

[57]

발명의 실시를 위한 형태

[58] 이하에서는 첨부한 도면을 참조하여 본 발명을 설명하기로 한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며, 따라서 여기에서 설명하는 실시 예로 한정되는 것은 아니다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.

[59] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 다른 부분과 "연결(접속, 접촉, 결합)"되어 있다고 할 때, 이는 "직접적으로 연결"되어 있는 경우뿐 아니라, 그 중간에 다른 부재를 사이에 두고 "간접적으로 연결"되어 있는 경우도 포함한다. 또한 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 구비할 수 있다는 것을 의미한다.

[60] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[61] 이하, 첨부된 도면을 참고하여 본 발명에 대하여 상세히 설명하기로 한다.

[62]

[63] 윤곽제어 알고리즘을 이용한 본 발명의 로봇 제어 방법은 2가지 방식으로 수행될 수 있으며, 하나의 방식인 제1방식에서는 레이저 트래커로 공구의 실제위치를 측정한 후 윤곽제어 알고리즘을 수행하여 공구의 위치와 방향에 대한 보정 제어를 수행하고, 다른 방식인 제2방식에서는 강성 모델과 절삭력 모델을 이용하여 실제위치를 연산한 후 윤곽제어 알고리즘을 수행하여 공구의 위치와 방향에 대한 보정 제어를 수행하는 것이다.

[64] 먼저, 상기와 같은 2가지 방식 중 제1방식에 의해 수행되는 본 발명의 로봇 제어 방법에 대해서 설명하기로 한다.

[65] 도 1은 본 발명의 일 실시 예에 따른 공구(111)의 위치 보정에 대한 모식도이고, 도 2는 본 발명의 일 실시 예에 따른 공구(111)의 위치 보정에 대한 그래프이다. 그리고, 도 3은 본 발명의 일 실시 예에 따른 로봇(120) 제어 장치에 대한 개략도이다.

[66] 가공 중 공구(111)의 실제 자세(실제 위치 및 방향)는 주로 절삭력으로 인한 처짐, 즉, 컴플라이언스 오류 및 운동학적 매개변수의 부정확성으로 인해 원하는 궤적에서 벗어나 윤곽 오류가 발생할 수 있다. 3차원(3-D) 로봇(120) 가공에서, 윤곽 오차는, 공구(111)의 참조위치와 실제위치(P_{act})의 차이인 위치윤곽오차(ε_p) 및, 공구(111)의 참조방향과 실제방향(O_{act})의 차이인 방향윤곽오차(ε_o)로 구성될 수 있다.

[67] 도 1과 도 2에서 보는 바와 같이, 참조자세(Reference pose)와 실제자세(Actual pose)를 이용하여, 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)를 포함하는 윤곽기준자세(Contour reference pose)를 도출할 수 있으며, 로봇(120) 가공에서의 위치윤곽오차(ε_p) 및 방향윤곽오차(ε_o)에 의한 자세오차($\varepsilon_{contour}$)를 도출할 수 있다.

[68] 위치윤곽오차(ε_p)는 실제위치(P_{act})에서 직교 좌표의 원하는 참조 궤적까지의 직교 거리로 정의될 수 있고, 위치윤곽오차(ε_p)는 실제위치(P_{act})와 실제위치(P_{act})에서 참조 궤적에서 가장 가까운 참조위치인 최근접참조위치(P_n)를 이용하여 연산될 수 있다. 그리고, 방향윤곽오차(ε_o)는, 원하는 방향(윤곽기준자세의 방향)과 실제 방향을 사용하여 연산할 수 있다. 이와 같은 사항에 대해서는 하기의 나머지 각 단계에서 상세히 설명하도록 한다.

[69]

[70] 이하, 본 발명의 로봇(120) 제어 방법에 대해서 설명하기로 한다.

[71] 먼저, 제1단계에서, 레이저 트래커(200)가 로봇(120)에 결합되어 공구(111)를 구비하는 가공부(110)로 레이저를 조사하여 공구(111)의 실시간 위치와 방향인 실제위치(P_{act})와 실제방향(O_{act})을 측정할 수 있다. 여기서, 로봇(120)은 복수 개의 링크과 관절을 구비하는 로봇(120)일 수 있으며, 공구(111)는 드릴링, 밀링, 연마 등을 수행하는 공구(111)일 수 있다. 다만, 이에 한정되는 것은 아니다.

[72] 도 3에서 보는 바와 같이, 공구(111)의 위치윤곽오차(ε_p) 및 방향윤곽오차(ε_o)를 정확하게 보정하기 위하여 레이저 트래커(200)를 사용하여 공구(111)의 실제 자세(위치와 방향)을 측정할 수 있다. 여기서, 공구(111) 관련 위치는 공구(111) 말단의 3차원 위치를 의미하고, 공구(111) 관련 방향은 공구(111)의 길이 방향으로 연장되는 z축 벡터 방향을 의미할 수 있다. 이하, 동일하다.

[73] 가공부(110)에 결합된 반사체(112)의 위치에 대한 행렬에 균일변환행렬(HTM)을 곱하는 변환 행렬 곱셈을 통해 공구(111)의 실제위치(P_{act})가 측정될 수 있다.

[74] 구체적으로, 도 3에서, {a}, {l}, {r} 및 {t}는 각각 로봇(120), 레이저 트래커(200),

반사체(112)인 6-DOF 반사경 및 공구(111) 각각의 프레임을 나타낼 수 있다. 여기서, 도구의 실제 자세는 직접 측정하는 것이 용이하지 않기 때문에, 변환 행렬 곱셈을 사용하여 간접적으로 획득될 수 있다.

[75] 구체적으로, 로봇(120) 프레임({a})에 대한 공구(111)의 자세는 하기의 [수학식 1]과 같이 연산될 수 있다.

[76] [수학식 1]

[77] $$T_{at}=T_{al}T_{lr}T_{rt}$$

[78] $$T_{ab}=\begin{vmatrix} R_{ab} & P_{ab} \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$ 은 균일변환행렬(HTM)이고 R, P 및 0은 각각 3x3 회전 행렬, 위치 벡터 및 1x3 제로 행렬을 나타낼 수 있다. 균일변환행렬(HTM)은, 프레임 {a}에서 프레임 {b}로의 변환 행렬, 또는, 프레임 {a}에 대한 프레임 {b}의 자세(또는 좌표)로 설명할 수 있다.

[79] 여기서, T_{at}는 로봇(120) 프레임({a})에 대한 공구(111)의 자세일 수 있고, T_{al}은 로봇(120) 프레임({a})에서 레이저 트래커(200)({l})로의 변환 행렬일 수 있다. 그리고, T_{lr}은 레이저 트래커(200)({l})에 대한 반사체(112)({r})의 자세일 수 있으며, T_{rt}는 반사체(112)({r})에서 공구(111) 프레임({t})으로의 변환 행렬일 수 있다.

[80] T_{al} 및 T_{rt}는 가공 프로세스의 영향을 받지 않는 상수 행렬이지만, 레이저 트래커(200)에서 제공하는 T_{lr}은 로봇(120)의 링크(매니퓰레이터)가 이동함에 따라 가공 중에 변경될 수 있다.

[81]

[82] 상기와 같은 제1단계 이후 제2단계에서, 가공대상(10)에 따라 사전에 설정된 공구(111)의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할하고, 참조가공경로 상 공구(111)의 위치와 방향인 참조위치와 참조방향을 설정할 수 있다. 여기서, 복수 개의 직선은 참조가공경로가 보간기(interpolator)에 의해 분할되어 형성될 수 있다.

[83] 로봇(120)을 제어하는 제어부(130)는, 로봇(120)의 가공 경로 계획을 위해 각 샘플링 주기에서 참조위치와 참조방향으로 구성된 참조자세 세트를 하기의 [수학식 2]와 같이 제공할 수 있다.

[84] [수학식 2]

[85] $$[P_r \;;\; O_r] = [X_r \quad Y_r \quad Z_r \quad Rx_r \quad Ry_r \quad Rz_r]^T$$

[86] 여기서, P_r 및 O_r은 데카르트 좌표의 기준 위치 및 방향일 수 있다. 또한, X_r, Y_r 및 Z_r은 각각 X, Y 및 Z축의 참조위치일 수 있다. 그리고, Rx_r, Ry_r, Rz_r은 각각 오일러 각으로 표시되는 Rx, Ry, Rz축의 참조방향일 수 있다.

[87] 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)를 도출하기 위해서는 상기와 같은 참조자세를 찾아야 하며, 참조 가공경로에 의한 참조 궤적은 보간기에 의해

분할된 복수 개의 직선으로 분할되며, 결과적으로 각 샘플링 기간에 대해 참조위치가 생성될 수 있다. 그리고, 각각의 참조위치에서의 공구(111)의 방향인 참조방향이 생성될 수 있다.

[88]

[89] 상기와 같은 제2단계 이후 제3단계에서, 복수 개의 직선 중 실제위치(P_{act})에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치(P_n)를 통과하는 2개의 직선 각각과 실제위치(P_{act})를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 공구(111)의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치(P_c)를 도출할 수 있다. 여기서, 2개의 직선은, 최근접참조위치(P_n)에 인접한 2개의 참조위치 각각과 최근접참조위치(P_n)를 연결하여 형성되는 제1연결직선 및 제2연결직선을 포함할 수 있다.

[90] 위치윤곽오차(ε_p)는 실제위치(P_{act})와 보간된 참조위치를 연결하는 선분에서 찾은 윤곽기준위치(P_c) 사이의 거리를 사용하여 연산될 수 있다. 이를 위해, 먼저, 탐색범위를 설정하고 탐색범위 내의 참조가공경로에 복수 개의 참조위치를 설정한 다음, 복수 개의 참조위치 중 공구(111)의 실제위치(P_{act})와 가장 근접한 최근접참조위치(P_n)를 연산하여 도출할 수 있다.

[91] 여기서, 탐색범위 내 복수 개의 참조위치는 실험적으로 20개 이상이 바람직할 수 있으나, 반드시 이에 한정되는 것은 아니다.

[92] 상기와 같은 최근접참조위치(P_n)를 도출한 후, 최근접참조위치(P_n)에 인접한 2개의 참조위치, 즉, 참조가공경로 상 가공 방향에 대해 최근접참조위치(P_n)의 전과 후의 방향에 위치한 2개의 참조위치인 제1인접참조위치(P_{n-1})과 제2인접참조위치(P_{n+1})가 설정될 수 있다.

[93] 여기서, 제1인접참조위치(P_{n-1})와 최근접참조위치(P_n)를 연결하여 제1연결직선이 형성되고, 제2인접참조위치(P_{n+1})와 최근접참조위치(P_n)를 연결하여 제2연결직선이 형성될 수 있다.

[94] 그리고, 실제위치(P_{act})로부터 제1연결직선으로 연결되는 제1수직연결선과 제1연결직선의 교점인 제1투영점(H_1) 및, 실제위치(P_{act})로부터 제2연결직선으로 연결되는 제2수직연결선과 제2연결직선의 교점인 제2투영점(H_2)이 설정될 수 있다.

[95] 상기와 같은 최근접참조위치(P_n)와 제1투영점(H_1) 및 제2투영점(H_1)을 이용하여 각각의 케이스에 따라 윤곽기준위치(Pc)를 도출할 수 있으며, 이에 대해서 하기에 상세히 설명하기로 한다.

[96] 도 4는 본 발명의 일 실시 예에 따른 윤곽기준위치(P_c)를 측정하기 위한 각 케이스의 설명을 위한 이미지이다. 도 4의 (a)는 제1케이스에 대한 것이고, 도 4의 (b)는 제2케이스에 대한 것이며, 도 4의 (c)는 제3케이스에 대한 것이다. 그리고, 도 4의 (d)는 제4케이스에 대한 것이다.

[97] 도 4에서 보는 바와 같이, 제1연결직선과 제2연결직선 각각에 대한 제1투영점과 제2투영점 각각의 위치에 따라 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)이 결정될 수 있다. 구체적으로, 4개의 케이스가 성립될 수

있으며, 제1연결직선과 제2연결직선 각각에 대한 제1투영점(H_1) 및 제2투영점(H_1) 각각의 위치를 기준으로 실제위치(P_{act})에 대한 윤곽기준위치(P_c)가 결정될 수 있다.

[98] 그리고, 하기의 [수학식 3-1]과 [수학식 3-2]에서 보는 바와 같이, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_1) 및 윤곽기준위치(P_c)의 연산을 위한 가중치를 결정하기 위해 r_1 및 r_2를 정의할 수 있다.

[99] [수학식 3-1]

[100] $$r_1 = \frac{\overrightarrow{P_n H_1}}{\overrightarrow{P_n P_{n-1}}}$$

[101] [수학식 3-2]

[102] $$r_2 = \frac{\overrightarrow{P_n H_2}}{\overrightarrow{P_n P_{n+1}}}$$

[103] 여기서, P_c는 윤곽기준위치를 나타내고, P_{n-1}은 제1인접참조위치를 나타내며, P_{n+1}은 제2인접참조위치를 나타낼 수 있다. 그리고, H_1은 제1투영점을 나타내고, H_2는 제2투영점을 나타낼 수 있다.

[104] 도 4의 (a)에서 보는 바와 같이, 제1케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 최근접참조위치(P_n)가 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[105] 제1케이스의 경우, $r_1>1$이고 $r_2>1$이므로, 실제위치(P_{act})에 가장 가까운 최근접참조위치(P_n)가 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[106] 도 4의 (b)에서 보는 바와 같이, 제2케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 제2투영점(H_2)이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[107] 그리고, 도 4의 (c)에서 보는 바와 같이, 제3케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 제1투영점(H_1)이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[108] 제2케이스와 제3케이스의 경우, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_2) 중 어느 하나의 투영점은 하나의 연결직선 내부에 위치하고, 다른 투영점은 다른 연결직선의 외부에 위치할 수 있다. 그리고, r_1 및 r_2이며, 연결직선의 내부, 즉, 연결직선 상에 위치하는 투영점이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[109] 도 4의 (d)에서 보는 바와 같이, 제4케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_2) 중 실제위치(P_{act})에 더 근접한 투영점이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[110] 제4케이스의 경우, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_2) 각각은 제1연결직선과 제2연결직선 내부에 위치하고, $0 \le r_1 \le 1$ 및 $0 \le r_2 \le 1$이며, 실제위치(P_{act})에 가장

가까운 투영점이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[111] 그리고, 상기와 같은 제2케이스 내지 제4케이스에서, 연결직선 상에 있는 윤곽기준위치(P_c)는, 하기의 [수학식 4-1] 또는 [수학식 4-2]에 의해, 최근접참조위치(P_n)와 인접한 참조위치인 제1인접참조위치(P_{n-1})와 제2인접참조위치(P_{n+1})의 선형 보간을 사용하여 연산될 수 있다.

[112] [수학식 4-1]

[113] $$P_c=(1-r_1)P_n+r_1P_{n-1}$$

[114]

[115] [수학식 4-2]

[116] $$P_c=(1-r_2)P_n+r_2P_{n+1}$$

[117] 여기서, P_c는 윤곽기준위치를 나타내고, P_{n-1}은 제1인접참조위치를 나타내며, P_{n+1}은 제2인접참조위치를 나타낼 수 있다.

[118] 그리고, 위치윤곽오차(ε_p)는 참조위치와 실제위치(P_{act}) 사이를 하기의 [수학식 5]와 같이 연산될 수 있다.

[119] [수학식 5]

[120] $$\varepsilon_p=||P_c-P_a||$$

[121] 여기서, ε_p는 위치윤곽오차를 나타내고, P_c는 윤곽기준위치를 나타내며, P_a는 실제위치(P_{act})를 나타낼 수 있다.

[122]

[123] 상기와 같은 제3단계 이후 제4단계에서, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향과 실제방향(O_{act})을 이용하여 공구(111)의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향(O_c)을 도출할 수 있다.

[124] 일반적인 로봇(120) 제어는 직관적이기 때문에 공구(111)의 방향 표현을 위해 오일러각을 이용할 수 있다. 그러나, 오일러각은 하나의 축의 변경이 순차적 회전으로 인해 다른 축에 영향을 미치기 때문에, 방향 보정을 처리하는데 적합하지 않을 수 있다.

[125] 따라서, 쿼터니언(Quternion, 사원수)은 회전 축을 동시에 처리하고 회전 행렬에 비해 연산이 더 효율적이기 때문에 방향 연산에 용이할 수 있다. 방향윤곽오차(ε_o)는, 참조방향과 실제방향(O_{act})을 이용하여 연산될 수 있으며, 윤곽기준방향(O_c)은, 상기된 제3단계에서의 각각의 케이스에 따라 방식을 달리하여 도출될 수 있다.

[126] 구체적으로, 상기된 제1케이스의 경우, 윤곽기준방향(O_c)은, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향일 수 있다. 그리고, 상기된 제2케이스 내지 제4케이스의 경우, 윤곽기준방향(O_c)은, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향과 최근접참조위치(P_n)에 인접한 참조위치(제1인접참조위치(P_{n-1})와 제2인접참조위치(P_{n+1}))에서의 참조방향을 이용한 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산으로 획득될

수 있다.

[127] 제2케이스 내지 제4케이스에서, 윤곽기준방향(O_c)은, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향인 최근접참조방향(O_n) 및 상기된 제1인접참조위치(P_{n-1})와 제2인접참조위치(P_{n+1}) 각각에서의 참조방향인 제1인접참조방향(O_{n-1})과 제2인접참조방향(O_{n+1})의 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산으로 획득할 수 있다. 여기서, 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산은 하기의 [수학식 6-1]과 [수학식 6-2]에 의해 연산될 수 있다.

[128] [수학식 6-1]

[129]

$$q_c = Slerp(q_n, q_{n-1}, r_1) = \frac{\sin[(1-r_1)\Omega]}{\sin\Omega} q_n + \frac{\sin[r_1\Omega]}{\sin\Omega} q_{n-1}$$

[130]

[131] [수학식 6-2]

[132]

$$q_c = Slerp(q_n, q_{n+1}, r_2) = \frac{\sin[(1-r_2)\Omega]}{\sin\Omega} q_n + \frac{\sin[r_2\Omega]}{\sin\Omega} q_{n+1}$$

[133] 여기서, 상기된 바와 같이, q_c는 윤곽기준방향(O_c)의 쿼터니언을 나타내고, q_n은 최근접참조방향(O_n)의 쿼터니언을 나타내며, q_{n-1}는 제1인접참조방향(O_{n-1})의 쿼터니언을 나타낼 수 있다. 그리고, q_{n+1}은 제2인접참조방향(O_{n+1})의 쿼터니언을 나타낼 수 있다.

[134] 그리고, 상기와 같이 획득되는 윤곽기준방향(O_c)의 3차원 좌표와 실제방향(O_{act})의 3차원 좌표 간 차이를 이용하여 방향윤곽오차(ε_o)에 대한 3차원 좌표를 도출할 수 있다. 이에 대해서는 하기의 제5단계 설명에서 상세히 설명하기로 한다.

[135] 상기와 같이 윤곽기준방향(O_c)을 도출하는 하나의 방식 외에, 윤곽기준방향(O_c)은, 윤곽기준위치(P_c)에서 공구(111)의 길이 방향을 따라 형성되는 축의 벡터 방향일 수 있다. 여기서, 공구(111)의 길이 방향을 따라 형성되는 축의 벡터는 공구(111)에서 z축 벡터일 수 있다.

[136] 구체적으로, 방향윤곽오차(ε_o)를 연산하기 위해 실제위치(P_{act})에서의 실제방향(O_{act})과 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향으로부터 z축 벡터를 추출할 수 있다. 그리고, 하기의 [수학식 7]과 같이, 방향윤곽오차(ε_o)는, 실제방향(O_{act})과 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향 각각의 z축 벡터 간 각도 차이를 이용하여 연산될 수 있다.

[137] [수학식 7]

[138]

$$\varepsilon_o = \cos^{-1}(v'_c \cdot v_a)$$

[139] 여기서, ε_o는 방향윤곽오차를 나타내고, v'_c는 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향의 z축 벡터를 나타내며, v_a는 실제방향(O_{act})의 z축 벡터를 나타낼 수 있다.

[140] 그리고, 상기와 같은 방향윤곽오차(ε_o)를 이용하여 각도 차이를 보정함으로써, 윤곽기준방향(O_c)을 도출할 수 있다.

[141]

[142] 상기와 같은 제4단계 이후 제5단계에서, 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)을 이용하여 로봇(120)을 제어함으로써 공구(111)의 위치와 방향을 제어할 수 있다. 상기와 같이, 공구(111)에 대해서, 실제위치(P_{act})와 윤곽기준위치(P_c)를 이용하여 위치윤곽오차(ε_p)를 도출할 수 있고, 실제방향(O_{act})과 윤곽기준방향(O_c)을 이용하여 방향윤곽오차(ε_o)을 도출할 수 있다. 그리고, 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)가 보정되도록 공구(111)의 위치와 방향이 변경되도록 로봇(120)으로 제어신호를 전달할 수 있다.

[143] 상기와 같은 제어신호는 하기된 제어부(130)에 의해 생성되며, 로봇(120)의 관절 축은 개별적으로 제어되고, 개별 축 각각에 대한 제어기는 위치, 속도 및 전류 루프와 연결된 캐스케이드 제어 구조로 구성될 수 있다. 이와 같은 제어부(130)에서는 상기와 같은 윤곽제어 알고리즘을 이용하여 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)를 도출할 수 있다.

[144] 종래기술의 로봇(120) 제어기에서는 내부 제어 구조의 수정을 허용하지 않기 때문에, 추가 PI(proportional-integral) 위치 제어 루프를 데카르트 좌표로 설계하여 등고선 오류를 보정할 수 있도록 함으로써, 본 발명의 제어부(130)를 형성할 수 있다.

[145] 따라서, 상기된 [수학식 2]를 수정하여 하기의 [수학식 8]을 도출할 수 있다.

[146] [수학식 8]

[147] $$[P_{r,m}\ ;\ O_{r,m}] = [P_r\ ;\ O_r] + K_{PI} \times [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z \quad \Delta Rx \quad \Delta Ry \quad \Delta Rz]^T$$

[148] 여기서, $P_{r,m}$은 수정된 참조위치이고, $O_{r,m}$은 수정된 참조방향일 수 있다. 그리고, K_{PI}는 각각의 축에 대한 PI제어 게인일 수 있으며, Δ는 각각의 축에 대한 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)를 나타낼 수 있다.

[149] 이에 따라, 공구(111)의 위치 보정량은 하기의 [수학식 9]와 같이 나타날 수 있다.

[150] [수학식 9]

[151] $$[\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T = [P_c - P_a]$$

[152] 여기서, Δ는 각각의 축에 대한 위치윤곽오차(ε_p)이고, P_c는 윤곽기준위치이며, P_a는 실제위치(P_{act})이다.

[153] 방향윤곽오차(ε_o)를 보상하기 위해 상기와 같이 z축 벡터를 이용할 수 있으며, 이와 같은 방식의 경우, [수학식 10]에서 보는 바와 같이, 실제방향(O_{act})과 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향 각각의 z축 벡터에 직교하는 단위방향벡터(n)가 생성될 수 있다. 그 다음, 방향윤곽오차(ε_o)의 양 만큼 단위방향벡터(n)에 대한 오차 보정을 수행할 수 있다.

[154] [수학식 10]

[155]
$$n = \frac{v_a \times v_c}{|v_a \times v_c|}$$

[156] 여기서, n은 단위방향벡터이고, v_a는 실제방향(O_{act})의 z축 벡터를 나타내고, v_c는 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향의 z축 벡터를 나타낼 수 있다.

[157] 도 5는 본 발명의 일 실시 예에 따른 방향윤곽오차(ε_o)의 측정에 대한 이미지이다.

[158] 방향윤곽오차(ε_o)를 보상하기 위해 상기와 같이 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP)을 이용할 수 있으며, 쿼터니언은 단위방향벡터(n)과 회전량(ε_o)을 사용하여 계산되고 오일러각으로 변환될 수 있다. 하기의 [수학식 11]에 의해서, q->E는 쿼터니언에서 오일러각으로 변환을 나타낼 수 있다.

[159] [수학식 11]

[160]
$$[\Delta Rx \quad \Delta Ry \quad \Delta Rz]^T = [\cos(\frac{\varepsilon_0}{2}) \quad n \cdot \sin(\frac{\varepsilon_0}{2})]^{q \to E}$$

[161] 여기서, n은 단위방향벡터이고, Δ는 각각의 축에 대한 방향윤곽오차(ε_o)이다.

[162]

[163] 이하, 본 발명의 로봇(120) 제어 장치에 대해 설명하기로 한다.

[164] 본 발명의 로봇(120) 제어 방법을 수행하는 본 발명의 로봇(120) 제어 장치는, 로봇(120)에 결합되어 공구(111)를 구비하는 가공부(110); 가공부(110)로 레이저를 조사하여 공구(111)의 실시간 위치와 방향인 실제위치(P_{act})와 실제방향(O_{act})을 측정하는 레이저 트래커(200); 가공대상(10)에 따라 사전에 설정된 공구(111)의 가공경로인 참조가공경로 상 공구(111)의 위치와 방향인 참조위치와 참조방향을 설정하며, 레이저 트래커(200)로부터 실제위치(P_{act})와 실제방향(O_{act})에 대한 정보를 전달받고, 윤곽기준위치(Pc)와 윤곽기준방향(Oc)을 도출하여, 로봇(120)으로 제어신호를 전달함으로써 공구(111)의 위치와 방향을 제어하는 제어부(130);를 포함한다. 여기서, 제어부(130)는, 공구(111)가 실제위치(P_{act})로부터 윤곽기준위치(P_c)로 이동하고 실제방향(O_{act})으로부터 윤곽기준방향(O_c)으로 자세를 변경하도록 로봇(120)으로 제어신호를 전달할 수 있다.

[165] 상기된 제1단계의 수행은 레이저 트래커(200)에 의해 수행될 수 있으며, 상기된 제2단계 내지 제5단계에서 수행되는 각각의 제어 관련 사항은 제어부(130)에서 수행될 수 있다.

[166] 본 발명의 로봇(120) 제어 장치에 대한 나머지 상세한 사항은, 본 발명의 로봇(120) 제어 방법에서 관련되어 기재된 사항과 동일하다.

[167] 상기와 같이 형성되는 본 발명의 로봇(120) 제어 장치; 및 로봇(120)의 형상, 참조가공경로 및 공구(111)에 대한 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)

각각으로의 보정량에 대한 수치를 표시하는 디스플레이 장치를 포함하는 가공 시스템을 형성할 수 있다.

[168] 디스플레이 장치에는, 로봇(120)의 3차원 형상 및 상기된 각각의 수치 값 중 일부 또는 전체가 표시될 수 있으며, 사용자는 디스플레이 화면을 보면서 로봇(120) 및 공구(111)의 작동 상황 등에 대해 육안으로 확인할 수 있다.

[169]

[170] 도 6은 본 발명의 일 실시 예에 따른 가공대상(10)에 대한 설계도이고, 도 7은 본 발명의 일 실시 예에 따른 로봇(120) 제어 장치를 이용한 로봇(120) 가공에 대한 이미지이다.

[171] 도 6은 본 발명의 로봇(120) 제어 장치를 이용한 본 발명의 로봇(120) 제어 방법의 성능을 테스트하기 위한 가공대상(10)에 대한 설계도로써 제어부(130)에 저장되며, 도 6의 (a)는 가공대상(10)의 평면도이고, 도 6의 (b)는 가공대상(10)의 측면도이며, 도 6의 (c)는 가공대상(10)의 사시도이다.

[172] 상기와 같은 본 발명의 로봇(120) 제어 방법에 의한 가공정밀도 향상을 측정하기 위하여, 로봇(120)(TX200, Staubli), 스핀들(ES929A, HSD) 및 레이저 트래커(200) 시스템(AT960MR, Leica geosystems)으로 구성된 로봇(120) 제어 장치를 마련하였다.

[173] 로봇(120)의 엔드이펙터인 가공부(110)에 스핀들이 부착되어 있고, 가공부(110)에 반사체(112)로써 6-DOF 센서(T-Mac, Leica geosystems)를 부착하였다. 레이저 트래커(200)는 반사체(112)의 위치와 방향을 최대 1kHz까지 실시간으로 측정할 수 있고, 상기와 같은 본 발명의 로봇(120) 제어 방법에 의한 알고리즘은 산업용 PC(C6930, Beckhoff)에서 실행되는 Beckhoff TwinCAT 실시간 프로그래밍 환경에서 구현되었으며 250Hz의 샘플 레이트로 실행되었다. 실시간 PC는 레이저 트래커(200) 컨트롤러에서 공간 측정 데이터를 수집하고 EtherCAT 프로토콜을 사용하여 로봇(120) 컨트롤러(CS8C, Stδubli)와 공구(111) 경로 및 수정 값을 교환할 수 있다.

[174] 본 발명의 로봇(120) 제어 방법에 의한 알고리즘의 성능을 비교 평가하기 위하여, NAS 979 공작물이 5축 공작 기계에 대한 성능 테스트로 널리 인정되기 때문에, 도 6에서 보는 바와 같이, 상기와 같은 로봇(120) 제어 장치를 이용하여 NAS(National Aerospace Standard) 979 공작물을 가공하였다.

[175] 이 때, 원과 사각형 및 측면 경사를 가공하여 성능을 평가하였다. 가공조건은 이송 속도 900mm/min, 스핀들 속도 6,000rpm, 절입 깊이 2mm로 결정되었다.(ISO 10791-1 참조)

[176] 가공된 가공대상(10)인 공작물의 치수 정확도는 좌표 측정기(CMM)를 이용하여 측정되었다. 좌표 측정기(CMM)의 반복성은 0.006mm이고 체적 정확도는 2.4㎛ + 길이/250mm이다. 원의 지름과 정사각형의 길이를 측정했으며, 원의 경계는 20포인트, 정사각형의 각 변은 10포인트를 측정하였다.

[177]

[178] 상기와 같은 공작물은 2개가 마련되어, 하나의 공작물인 실시용 공작물은 본 발명의 로봇(120) 제어 방법을 적용하여 가공하였으며, 다른 공작물인 비교용 공작물은 종래기술의 로봇(120) 제어 방법을 적용하여 가공하였다.

[179] 여기서, 원에 대한 목표지름은 108mm이고, 정사각형의 각 변의 목표길이는 110mm이었다.

[180] 각각의 공작물에 대한 가공 종료 후, 비교용 공작물을 측정한 경우, 측정된 원의 지름은 108.322mm로써 원의 가공 오차는 322㎛이었고, 정사각형의 측정된 길이는 각 변에 대해 110.356 및 110.353mm로써 정사각형의 가공 오차는 356㎛이었다.

[181] 반면에, 실시용 공작물을 측정한 경우, 측정된 원의 지름은 107.945mm로써 원의 가공오차는 55㎛이고, 정사각형의 측정된 길이는 각 변에 대해 110.049 및 109.950mm로써 정사각형의 가공 오차는 50㎛이었다.

[182] 상기된 비교용 공작물과 실시용 공작물의 가공 후 가공오차 비교에서 보는 바와 같이, 본 발명의 로봇(120) 제어 방법을 이용하여 공작물에 대한 가공을 수행하는 경우, 가공 정밀도가 향상됨을 확인할 수 있다.

[183]

[184] 상기와 같은 본 발명의 로봇(120) 제어 방법 및 장치를 이용하는 경우, 공구(111)의 실제위치(P_{act})와 사전에 설정된 참조위치 간 차이를 이용하여 가공대상(10)에 대한 가공경로의 오차 보정을 수행하므로, 오차 보정의 성능을 향상시킬 수 있다.

[185] 그리고, 추가적인 별도의 장치나 복잡한 연산을 최소화하면서도 로봇(120)에 대한 오차 보정 제어를 수행할 수 있어, 로봇(120)을 이용한 가공공정에서의 효율을 현저히 향상시킬 수 있다.

[186]

[187] 이하, 상기와 같은 2가지 방식 중 제2방식에 의해 수행되는 본 발명의 로봇 제어 방법에 대해서 설명하기로 한다.

[188] 도 8은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 로봇 제어 장치에 대한 개략도이고, 도 9는 본 발명의 다른 실시 예에 따른 로봇 제어 장치의 일부에 대한 구성도이다.

[189] 제1방식에서 설명된 각각의 도면 중, 도 1과 도 2 및 도 4와 도 5 각각은 윤곽제어 알고리즘에 대한 것으로써, 제2방식에도 동일하게 적용될 수 있다.

[190] 먼저, 제1단계에서, 복수 개의 링크와 복수 개의 관절을 구비하여 구동하는 로봇(120), 로봇(120)의 말단과 결합하고 공구(111)를 구비하여 가공대상(10)에 대한 가공을 수행하는 가공부(110) 및, 공구(111)가 가공대상(10)에 대한 작업 시, 로봇(120)의 자세를 제어하는 제어부(130)를 마련할 수 있다.

[191] 그리고, 제어부(130)는, 강성데이터와 절삭력에 대한 정보를 이용하여, 공구의 컴플라이언스오차(Δx)를 도출하고, 가공대상(10)에 따라 사전에 설정된 공구(111)의 가공경로인 참조가공경로 상 공구(111)의 위치와 방향인 참조위치와 참조방향을 설정함으로써, 컴플라이언스오차(Δx) 및 참조위치와

참조방향을 이용하여 실제위치(P_{act})와 실제방향(O_{act})에 대한 정보를 생성하고, 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)을 도출하여, 로봇(120)으로 제어신호를 전달함으로써 상기 공구의 위치와 방향을 제어할 수 있다.

[192] 이와 같은 본 발명의 로봇(120) 제어 장치를 이용한 본 발명의 로봇(120) 제어 방법에 대해서, 하기의 각 단계에서 더욱 상세히 설명하기로 한다.

[193] 상기와 같은 제1단계 이후 제2단계에서, 로봇(120)의 자세에 따라 가변하는 복수 개의 관절 각각에 대한 강성 값인 강성데이터와 공구(111)에 작용되는 힘인 절삭력에 대한 정보를 이용하여, 공구(111)에 대해 연산된 가공오차인 컴플라이언스오차(Δx)를 연산하여 도출할 수 있다.

[194] 강성데이터에는 각각의 가공공정 수행 시 로봇(120)의 자세에 대한 데이터가 수집 저장되어 있으며, 이와 같은 강성데이터를 이용하여 하기와 같은 강성행렬(K_x)을 도출할 수 있다.

[195] 제어부(130)에는 가공대상(10)에 대한 공구(111)인 이동경로인 참조가공경로가 사전에 저장되어 있으며, 이와 같은 참조가공경로를 따라 공구(111)가 이동하는 경우, 공구(111)의 이동 경로 상 각각의 위치에서의 로봇(120)의 자세가 제어부(130)에 저장될 수 있으며, 이를 이용하여, 제어부(130)는 참조가공경로를 이용하여 로봇(120)의 자세 변형을 예측할 수 있다.

[196] 여기서, 로봇(120)의 자세 변형이란, 복수 개의 관절 각각의 3차원 회전각 및 복수 개의 링크 각각의 3차원 위치가 반영되어 로봇(120)의 자세가 변경 및 결정되는 것을 의미할 수 있다.

[197]

[198] 제어부(130)는, 가공대상(10)에 형성된 복수 개의 가공부(110)위 각각에 대한 절삭력의 데이터인 절삭력모델링데이터를 저장할 수 있다. 사용자가 제어부(130)에 가공대상(10)의 종류에 대한 정보를 입력하면, 제어부(130)는 해당 가공대상(10)과 관련된 정보를 절삭력모델링데이터에서 서칭하게 되고, 매칭되는 데이터를 이용하여 해당 가공대상(10)에서 복수 개의 가공부(110)위 각각에 대한 절삭력을 도출하여 이용할 수 있다.

[199] 이와 같은 방식으로 절삭력을 도출하는 경우, offline 상태에서도 로봇(120)의 제어를 수행할 수 있어, 로봇(120)을 이용한 가공의 안정성을 향상시킬 수 있다.

[200] 또는, 가공부(110)는, 절삭력을 측정하는 힘센서(121)를 구비할 수 있다. 여기서, 힘센서(121)는 가공부(110)의 외부 또는 내부에 형성될 수 있으며, 힘센서(121)는 가공부(110) 내 공구(111)와 연결된 스핀들에 가해지는 압력 및 토크를 측정할 수 있다.

[201] 여기서, 스핀들에 가해지는 압력 및 토크는 3차원 방향으로 측정될 수 있으며, 제어부(130)는 이와 같은 스핀들에 대한 압력 및 토크 값을 이용하여 절삭력을 도출할 수 있으며, 이를 위해 제어부(130)는 절삭력 측정을 위한 공구(111)동력계(dynamometer)를 구비할 수 있다.

[202]

[203] 컴플라이언스오차(Δx)는 로봇 머니퓰레이터의 불충분한 구조적 강성으로 인해 발생할 수 있다. 컴플라이언스(Compliance)의 주요 요인은 베어링, 모터 샤프트, 기어 및 기어박스와 같은 로봇의 관절에 설치되는 부품일 수 있다. 링크의 강성은 관절(조인트)보다 훨씬 크기 때문에 링크가 강성인 것으로 가정하고 모든 컴플라이언스는 관절 부분에만 집중될 수 있다.
컴플라이언스오차(Δx)는 모터 엔코더로 측정할 수 없기 때문에 로봇(120) 가공 중 컴플라이언스오차(Δx)를 추정하기 위해 컴플라이언스 모델을 이용할 수 있다.

[204] 외력(external wrench)에 의해 유도된 로봇의 관절 토크(τ)는, 하기의 [수학식 1]에 의해 도출될 수 있다.

[205] [수학식 12]

[206] $$\tau = J^T \Phi$$

[207]

[208] 여기서, τ는 관절 토크이고, J는 자코비안 행렬이며, Φ는 외력일 수 있다.
그리고, 하기와 같이 외력은 절삭력일 수 있다.

[209] 그리고, 상기와 같은 [수학식 12]에 대한 편도함수는 [수학식 13]과 같이 표현될 수 있으며, [수학식 13]은 [수학식 14]와 같이 데카르트 강성행렬(K_x)의 관점에서 재정렬될 수 있다.

[210] [수학식 13]

[211] $$\underbrace{\frac{\partial \tau}{\partial \theta}}_{K_A} = \left(\frac{\partial J^T}{\partial \theta}\right)\Phi + J^T \underbrace{\frac{\partial \Phi}{\partial x}}_{K_x} \underbrace{\frac{\partial x}{\partial \theta}}_{J}$$

[212] [수학식 14]

[213] $$K_x = J^{-T}\left\{K_\theta - \frac{\partial J^T}{\partial \theta}\Phi\right\}J^{-1}$$

[214] 여기서, K_0는 관절 강성행렬이고, $\left(\frac{\partial J^T}{\partial \theta}\right)\Phi$ 는 상보적 강성행렬일 수 있다.
일반적인 경우에는 상보적 강성행렬의 효과가 관절 강성행렬에 비해 상대적으로 작기 때문에 무시할 수 있다. 따라서, 컴플라이언스 모델에 대한 수학식은 [수학식 15]와 같이 도출될 수 있다.

[215] 그리고, 제어부(130)는, 하기의 [수학식 15]를 이용하여 컴플라이언스오차(Δx)를 도출할 수 있다. 여기서, Δx는 컴플라이언스오차이고, C_x는 데카르트 컴플라이언스 행렬이며, Φ는 절삭력이고, C_0는 로봇(120)의 관절에 대한 컴플라이언스 행렬이며, J는 자코비안 행렬이고, T는 전치행렬(이하, 동일)일 수 있다. 이하, 로봇(120)의 관절(조인트)에 대한

컴플라이언스 행렬은 관절 컴플라이언스 행렬이라고 할 수 있다.

[216] [수학식 15]

[217] $$\Delta x = C_x \Phi = J C_\theta J^T \Phi$$

[218] 데카르트 컴플라이언스 행렬은 자코비안 행렬과 관절 컴플라이언스 행렬을 곱하여 연산될 수 있다. 관절 컴플라이언스 행렬은 각각의 요소가 관절 컴플라이언스 값인 대각 행렬, 즉, $C_0=\text{diag}(1/K_{01}, ..., 1/K_{0i}, ..., 1/K_{06})$일 수 있다. 여기서, K_{0i}는 로봇(120)의 각 관절에 대한 강성 값을 나타내고, 관절의 강성 값은 각 관절의 힘/변위 관계를 사용하여 식별될 수 있다.

[219]

[220] 가공 중 공구(111)의 실제 자세(실제 위치 및 방향)는 주로 절삭력으로 인한 처짐, 즉, 컴플라이언스 오류 및 운동학적 매개변수의 부정확성으로 인해 원하는 궤적에서 벗어나 윤곽 오류가 발생할 수 있다. 3차원(3-D) 로봇 가공에서, 윤곽 오차는, 공구(111)의 참조위치와 실제위치(P_{act})의 차이인 위치윤곽오차(ε_p) 및, 공구(111)의 참조방향과 실제방향(O_{act})의 차이인 방향윤곽오차(ε_o)로 구성될 수 있다.

[221] 도 1과 도 2에서 보는 바와 같이, 참조자세(Reference pose)와 실제자세(Actual pose)를 이용하여, 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)를 포함하는 윤곽기준자세(Contour reference pose)를 도출할 수 있으며, 로봇(120) 가공에서의 위치윤곽오차(ε_p) 및 방향윤곽오차(ε_o)에 의한 자세오차($\varepsilon_{contour}$)를 도출할 수 있다.

[222] 위치윤곽오차(ε_p)는 실제위치(P_{act})에서 직교 좌표의 원하는 참조 궤적까지의 직교 거리로 정의될 수 있고, 위치윤곽오차(ε_p)는 실제위치(P_{act})와 실제위치(P_{act})에서 참조 궤적에서 가장 가까운 참조위치인 최근접참조위치(P_n)를 이용하여 연산될 수 있다. 그리고, 방향윤곽오차(ε_o)는, 원하는 방향(윤곽기준자세의 방향)과 실제 방향을 사용하여 연산할 수 있다. 이와 같은 사항에 대해서는 하기의 나머지 각 단계에서 상세히 설명하도록 한다.

[223] 상기와 같은 제2단계 이후 제3단계에서, 가공대상(10)에 따라 사전에 설정된 공구(111)의 가공경로인 참조가공경로 상 공구(111)의 위치 및 방향인 참조위치 및 참조방향, 그리고, 컴플라이언스오차(Δx)를 이용하여, 공구(111)의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 측정할 수 있다.

[224] 제어부(130)는, 참조가공경로에의 참조위치와 참조방향 및 컴플라이언스오차(Δx)를 이용하여 공구(111)의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 도출할 수 있다. 구체적으로, 참조가공경로 상 참조위치는 3차원 위치로 표현되며 참조방향은 3차원 방향으로 설정되며, 컴플라이언스오차(Δx)는 3차원 위치와 방향을 모두 포함할 수 있다. 그리고, 참조위치와 참조방향에서 컴플라이언스오차(Δx)에 의한 오차를 연산함으로서, 3차원 위치와 방향에 있어 공구(111)의 실시간, 즉, 현재 상태에 대한 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 연산할 수 있다.

[225] 상기와 같은 제3단계 이후 제4단계에서, 가공대상(10)에 따라 사전에 설정된 공구(111)의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할할 수 있다. 여기서, 복수 개의 직선은 참조가공경로가 보간기(interpolator)에 의해 분할되어 형성될 수 있다.

[226] 로봇(120)을 제어하는 제어부(130)는, 로봇(120)의 가공 경로 계획을 위해 각 샘플링 주기에서 참조위치와 참조방향으로 구성된 참조자세 세트를 하기의 [수학식 16]와 같이 제공할 수 있다.

[227] [수학식 16]

[228] $$[P_r \;;\; O_r] = [X_r \quad Y_r \quad Z_r \quad Rx_r \quad Ry_r \quad Rz_r]^T$$

[229] 여기서, P_r 및 O_r은 데카르트 좌표의 기준 위치 및 방향일 수 있다. 또한, X_r, Y_r 및 Z_r은 각각 X, Y 및 Z축의 참조위치일 수 있다. 그리고, Rx_r, Ry_r, Rz_r은 각각 오일러 각으로 표시되는 Rx, Ry, Rz축의 참조방향일 수 있다.

[230] 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)를 도출하기 위해서는 상기와 같은 참조자세를 찾아야 하며, 참조 가공경로에 의한 참조 궤적은 보간기에 의해 분할된 복수 개의 직선으로 분할되며, 결과적으로 각 샘플링 기간에 대해 참조위치가 생성될 수 있다. 그리고, 각각의 참조위치에서의 공구(111)의 방향인 참조방향이 생성될 수 있다.

[231]

[232] 상기와 같은 제4단계 이후 제5단계에서, 복수 개의 직선 중 실제위치(P_{act})에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치(P_n)를 통과하는 2개의 직선 각각과 실제위치(P_{act})를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 공구(111)의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치(Pc)를 도출할 수 있다. 여기서, 2개의 직선은, 최근접참조위치(P_n)에 인접한 2개의 참조위치 각각과 최근접참조위치(P_n)를 연결하여 형성되는 제1연결직선 및 제2연결직선을 포함할 수 있다.

[233] 위치윤곽오차(ε_p)는 실제위치(P_{act})와 보간된 참조위치를 연결하는 선분에서 찾은 윤곽기준위치(P_c) 사이의 거리를 사용하여 연산될 수 있다. 이를 위해, 먼저, 탐색범위를 설정하고 탐색범위 내의 참조가공경로에 복수 개의 참조위치를 설정한 다음, 복수 개의 참조위치 중 공구(111)의 실제위치(P_{act})와 가장 근접한 최근접참조위치(P_n)를 연산하여 도출할 수 있다.

[234] 여기서, 탐색범위 내 복수 개의 참조위치는 실험적으로 20개 이상이 바람직할 수 있으나, 반드시 이에 한정되는 것은 아니다.

[235] 상기와 같은 최근접참조위치(P_n)를 도출한 후, 최근접참조위치(P_n)에 인접한 2개의 참조위치, 즉, 참조가공경로 상 가공 방향에 대해 최근접참조위치(P_n)의 전과 후의 방향에 위치한 2개의 참조위치인 제1인접참조위치(P_{n-1})과 제2인접참조위치(P_{n+1})가 설정될 수 있다.

[236] 여기서, 제1인접참조위치(P_{n-1})와 최근접참조위치(P_n)를 연결하여 제1연결직선이 형성되고, 제2인접참조위치(P_{n+1})와 최근접참조위치(P_n)를

연결하여 제2연결직선이 형성될 수 있다.

[237] 그리고, 실제위치(P_{act})로부터 제1연결직선으로 연결되는 제1수직연결선과 제1연결직선의 교점인 제1투영점(H_1) 및, 실제위치(P_{act})로부터 제2연결직선으로 연결되는 제2수직연결선과 제2연결직선의 교점인 제2투영점(H_2)이 설정될 수 있다.

[238] 상기와 같은 최근접참조위치(P_n)와 제1투영점(H_1) 및 제2투영점(H_1)을 이용하여 각각의 케이스에 따라 윤곽기준위치(P_c)를 도출할 수 있으며, 이에 대해서 하기에 상세히 설명하기로 한다.

[239] 도 4의 (a)는 제1케이스에 대한 것이고, 도 4의 (b)는 제2케이스에 대한 것이며, 도 4의 (c)는 제3케이스에 대한 것이다. 그리고, 도 4의 (d)는 제4케이스에 대한 것이다.

[240] 도 4에서 보는 바와 같이, 제1연결직선과 제2연결직선 각각에 대한 제1투영점과 제2투영점 각각의 위치에 따라 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)이 결정될 수 있다. 구체적으로, 4개의 케이스가 성립될 수 있으며, 제1연결직선과 제2연결직선 각각에 대한 제1투영점(H_1) 및 제2투영점(H_1) 각각의 위치를 기준으로 실제위치(P_{act})에 대한 윤곽기준위치(P_c)가 결정될 수 있다.

[241] 그리고, 하기의 [수학식 17-1]과 [수학식 17-2]에서 보는 바와 같이, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_1) 및 윤곽기준위치(P_c)의 연산을 위한 가중치를 결정하기 위해 r_1 및 r_2를 정의할 수 있다.

[242] [수학식 17-1]

[243] $$r_1 = \frac{\overrightarrow{P_n H_1}}{\overrightarrow{P_n P_{n-1}}}$$

[244] [수학식 17-2]

[245] $$r_2 = \frac{\overrightarrow{P_n H_2}}{\overrightarrow{P_n P_{n+1}}}$$

[246] 여기서, Pc는 윤곽기준위치를 나타내고, P_{n-1}은 제1인접참조위치를 나타내며, P_{n+1}은 제2인접참조위치를 나타낼 수 있다. 그리고, H_1은 제1투영점을 나타내고, H_2는 제2투영점을 나타낼 수 있다.

[247] 도 4의 (a)에서 보는 바와 같이, 제1케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 최근접참조위치(P_n)가 윤곽기준위치(Pc)일 수 있다.

[248] 제1케이스의 경우, $r_1>1$이고 $r_2>1$이므로, 실제위치(P_{act})에 가장 가까운 최근접참조위치(P_n)가 윤곽기준위치(Pc)일 수 있다.

[249] 도 4의 (b)에서 보는 바와 같이, 제2케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선 상에

위치하는 경우, 제2투영점(H_2)이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[250] 그리고, 도 4의 (c)에서 보는 바와 같이, 제3케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 제1투영점(H_1)이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[251] 제2케이스와 제3케이스의 경우, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_2) 중 어느 하나의 투영점은 하나의 연결직선 내부에 위치하고, 다른 투영점은 다른 연결직선의 외부에 위치할 수 있다. 그리고, r_1 및 r_2이며, 연결직선의 내부, 즉, 연결직선 상에 위치하는 투영점이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[252] 도 4의 (d)에서 보는 바와 같이, 제4케이스로써, 제1투영점(H_1)이 제1연결직선 상에 위치하고 제2투영점(H_2)이 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_2) 중 실제위치(P_{act})에 더 근접한 투영점이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[253] 제4케이스의 경우, 제1투영점(H_1)과 제2투영점(H_2) 각각은 제1연결직선과 제2연결직선 내부에 위치하고, $0 \le r_1 \le 1$ 및 $0 \le r_2 \le 1$이며, 실제위치(P_{act})에 가장 가까운 투영점이 윤곽기준위치(P_c)일 수 있다.

[254] 그리고, 상기와 같은 제2케이스 내지 제4케이스에서, 연결직선 상에 있는 윤곽기준위치(P_c)는, 하기의 [수학식 18-1] 또는 [수학식 18-2]에 의해, 최근접참조위치(P_n)와 인접한 참조위치인 제1인접참조위치(P_{n-1})와 제2인접참조위치(P_{n+1})의 선형 보간을 사용하여 연산될 수 있다.

[255] [수학식 18-1]

[256] $$P_c = (1 - r_1)P_n + r_1 P_{n-1}$$

[257]

[258] [수학식 18-2]

[259] $$P_c = (1 - r_2)P_n + r_2 P_{n+1}$$

[260] 여기서, P_c는 윤곽기준위치를 나타내고, P_{n-1}은 제1인접참조위치를 나타내며, P_{n+1}은 제2인접참조위치를 나타낼 수 있다.

[261] 그리고, 위치윤곽오차(ε_p)는 참조위치와 실제위치(P_{act}) 사이를 하기의 [수학식 19]와 같이 연산될 수 있다.

[262] [수학식 19]

[263] $$\varepsilon_p = ||P_c - P_a||$$

[264] 여기서, ε_p는 위치윤곽오차를 나타내고, P_c는 윤곽기준위치를 나타내며, P_a는 실제위치(P_{act})를 나타낼 수 있다.

[265]

[266] 상기와 같은 제5단계 이후 제6단계에서, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향과 실제방향(O_{act})을 이용하여 공구(111)의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향(O_c)을 도출할 수 있다.

[267] 일반적인 로봇(120) 제어는 직관적이기 때문에 공구(111)의 방향 표현을 위해 오일러각을 이용할 수 있다. 그러나, 오일러각은 하나의 축의 변경이 순차적 회전으로 인해 다른 축에 영향을 미치기 때문에, 방향 보정을 처리하는데 적합하지 않을 수 있다.

[268] 따라서, 쿼터니언(Quternion, 사원수)은 회전 축을 동시에 처리하고 회전 행렬에 비해 연산이 더 효율적이기 때문에 방향 연산에 용이할 수 있다.
방향윤곽오차(εo)는, 참조방향과 실제방향(Oact)을 이용하여 연산될 수 있으며, 윤곽기준방향(O_c)은, 상기된 제3단계에서의 각각의 케이스에 따라 방식을 달리하여 도출될 수 있다.

[269] 구체적으로, 상기된 제1케이스의 경우, 윤곽기준방향(O_c)은, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향일 수 있다. 그리고, 상기된 제2케이스 내지 제4케이스의 경우, 윤곽기준방향(O_c)은, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향과 최근접참조위치(P_n)에 인접한 참조위치(제1인접참조위치(P_{n-1})와 제2인접참조위치(P_{n+1}))에서의 참조방향을 이용한 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산으로 획득될 수 있다.

[270] 제2케이스 내지 제4케이스에서, 윤곽기준방향(Oc)은, 최근접참조위치(P_n)에서의 참조방향인 최근접참조방향(O_n) 및 상기된 제1인접참조위치(P_{n-1})와 제2인접참조위치(P_{n+1}) 각각에서의 참조방향인 제1인접참조방향(O_{n-1})과 제2인접참조방향(O_{n+1})의 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산으로 획득할 수 있다. 여기서, 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP) 연산은 하기의 [수학식 20-1]과 [수학식 20-2]에 의해 연산될 수 있다.

[271] [수학식 20-1]

[272]
$$q_c = Slerp(q_n, q_{n-1}, r_1) = \frac{\sin[(1-r_1)\Omega]}{\sin\Omega} q_n + \frac{\sin[r_1\Omega]}{\sin\Omega} q_{n-1}$$

[273]

[274] [수학식 20-2]

[275]
$$q_c = Slerp(q_n, q_{n+1}, r_2) = \frac{\sin[(1-r_2)\Omega]}{\sin\Omega} q_n + \frac{\sin[r_2\Omega]}{\sin\Omega} q_{n+1}$$

[276] 여기서, 상기된 바와 같이, q_c는 윤곽기준방향(O_c)의 쿼터니언을 나타내고, q_n은 최근접참조방향(O_n)의 쿼터니언을 나타내며, q_{n-1}는 제1인접참조방향(O_{n-1})의 쿼터니언을 나타낼 수 있다. 그리고, q_{n+1}은 제2인접참조방향(O_{n+1})의 쿼터니언을 나타낼 수 있다.

[277] 그리고, 상기와 같이 획득되는 윤곽기준방향(O_c)의 3차원 좌표와 실제방향(O_{act})의 3차원 좌표 간 차이를 이용하여 방향윤곽오차(ε_o)에 대한 3차원 좌표를 도출할 수 있다. 이에 대해서는 하기의 제5단계 설명에서 상세히 설명하기로 한다.

[278] 상기와 같이 윤곽기준방향(O_c)을 도출하는 하나의 방식 외에, 윤곽기준방향(O_c)은, 윤곽기준위치(P_c)에서 공구(111)의 길이 방향을 따라 형성되는 축의 벡터 방향일 수 있다. 여기서, 공구(111)의 길이 방향을 따라 형성되는 축의 벡터는 공구(111)에서 z축 벡터일 수 있다.

[279] 구체적으로, 방향윤곽오차(ε_o)를 연산하기 위해 실제위치(P_{act})에서의 실제방향(O_{act})과 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향으로부터 z축 벡터를 추출할 수 있다. 그리고, 하기의 [수학식 21]과 같이, 방향윤곽오차(ε_o)는, 실제방향(O_{act})과 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향 각각의 z축 벡터 간 각도 차이를 이용하여 연산될 수 있다.

[280] [수학식 21]

[281] $$\varepsilon_o = \cos^{-1}(v'_c \cdot v_a)$$

[282] 여기서, ε_o는 방향윤곽오차를 나타내고, v'_c는 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향의 z축 벡터를 나타내며, v_a는 실제방향(O_{act})의 z축 벡터를 나타낼 수 있다.

[283] 그리고, 상기와 같은 방향윤곽오차(ε_o)를 이용하여 각도 차이를 보정함으로써, 윤곽기준방향(O_c)을 도출할 수 있다.

[284]

[285] 상기와 같은 제6단계 이후 제7단계에서, 윤곽기준위치(P_c)와 윤곽기준방향(O_c)을 이용하여 로봇(120)을 제어함으로써 공구(111)의 위치와 방향을 제어할 수 있다. 상기와 같이, 공구(111)에 대해서, 실제위치(P_{act})와 윤곽기준위치(P_c)를 이용하여 위치윤곽오차(ε_p)를 도출할 수 있고, 실제방향(O_{act})과 윤곽기준방향(O_c)을 이용하여 방향윤곽오차(ε_o)을 도출할 수 있다. 그리고, 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)가 보정되도록 공구(111)의 위치와 방향이 변경되도록 로봇(120)으로 제어신호를 전달할 수 있다.

[286] 상기와 같은 제어신호는 제어부(130)에 의해 생성되며, 로봇(120)의 관절 축은 개별적으로 제어되고, 개별 축 각각에 대한 제어기는 위치, 속도 및 전류 루프와 연결된 캐스케이드 제어 구조로 구성될 수 있다. 이와 같은 제어부(130)에서는 상기와 같은 윤곽제어 알고리즘을 이용하여 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)를 도출할 수 있다.

[287] 종래기술의 로봇 제어기에서는 내부 제어 구조의 수정을 허용하지 않기 때문에, 추가 PI(proportional-integral) 위치 제어 루프를 데카르트 좌표로 설계하여 등고선 오류를 보정할 수 있도록 함으로써, 본 발명의 제어부(130)를 형성할 수 있다.

[288] 따라서, 상기된 [수학식 16]을 수정하여 하기의 [수학식 22]를 도출할 수 있다.

[289] [수학식 22]

[290] $$[P_{r,m}\ ;\ O_{r,m}] = [P_r\ ;\ O_r] + K_{PI} \times [\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z \quad \Delta Rx \quad \Delta Ry \quad \Delta Rz]^T$$

[291] 여기서, $P_{r,m}$은 수정된 참조위치이고, $O_{r,m}$은 수정된 참조방향일 수 있다. 그리고, K_{PI}는 각각의 축에 대한 PI제어 게인일 수 있으며, Δ는 각각의 축에 대한 위치윤곽오차(ε_p)와 방향윤곽오차(ε_o)를 나타낼 수 있다.

[292] 이에 따라, 공구(111)의 위치 보정량은 하기의 [수학식 23]과 같이 나타날 수 있다.

[293] [수학식 23]

[294] $$[\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z]^T = [P_c - P_a]$$

[295] 여기서, Δ는 각각의 축에 대한 위치윤곽오차(ε_p)이고, P_c는 윤곽기준위치이며, P_a는 실제위치(P_{act})이다.

[296] 방향윤곽오차(ε_o)를 보상하기 위해 상기와 같이 z축 벡터를 이용할 수 있으며, 이와 같은 방식의 경우, [수학식 13]에서 보는 바와 같이, 실제방향(O_{act})과 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향 각각의 z축 벡터에 직교하는 단위방향벡터(n)가 생성될 수 있다. 그 다음, 방향윤곽오차(ε_o)의 양 만큼 단위방향벡터(n)에 대한 오차 보정을 수행할 수 있다.

[297] [수학식 24]

[298] $$n = \frac{v_a \times v_c}{|v_a \times v_c|}$$

[299] 여기서, n은 단위방향벡터이고, v_a는 실제방향(O_{act})의 z축 벡터를 나타내고, v_c는 윤곽기준위치(P_c)에서의 참조방향의 z축 벡터를 나타낼 수 있다.

[300] 도 5에서 보는 바와 같이, 방향윤곽오차(ε_o)를 보상하기 위해 상기와 같이 쿼터니언(Quternion) 구면선형보간(SLERP)을 이용할 수 있으며, 쿼터니언은 단위방향벡터(n)과 회전량(ε_o)을 사용하여 계산되고 오일러각으로 변환될 수 있다. 하기의 [수학식 25]에 의해서, q->E는 쿼터니언에서 오일러각으로 변환을 나타낼 수 있다.

[301] [수학식 25]

[302] $$[\Delta Rx \quad \Delta Ry \quad \Delta Rz]^T = [\cos(\frac{\varepsilon_0}{2}) \quad n \cdot \sin(\frac{\varepsilon_0}{2})]^{q \to E}$$

[303] 여기서, n은 단위방향벡터이고, Δ는 각각의 축에 대한 방향윤곽오차(ε_o)이다.

[304]

[305] 상기와 같이 형성되는 본 발명의 로봇(120) 제어 장치; 및 로봇(120)의 형상 및 자세 변화, 참조가공경로 및 공구(111)에 대한 윤곽기준위치(Pc)와 윤곽기준방향(Oc) 각각으로의 보정량에 대한 수치를 표시하는 디스플레이 장치를 포함하는 가공 시스템을 형성할 수 있다.

[306] 디스플레이 장치에는, 로봇(120)의 3차원 형상 및 상기된 각각의 수치 값 중 일부 또는 전체가 표시될 수 있으며, 사용자는 디스플레이 화면을 보면서

로봇(120) 및 공구(111)의 작동 상황 등에 대해 육안으로 확인할 수 있다.

[307] 상기와 같은 본 발명의 로봇(120) 제어 방법 및 장치를 이용하는 경우, 현재 공구(111)의 위치인 실제위치(P_{act})와 사전에 설정된 참조위치 간 차이를 이용하여 가공대상(10)에 대한 가공경로의 오차 보정을 수행하므로, 오차 보정의 성능을 향상시킬 수 있다.

[308] 그리고, 추가적인 별도의 장치나 복잡한 연산을 최소화하면서도 로봇(120)에 대한 오차 보정 제어를 수행할 수 있어, 로봇(120)을 이용한 가공공정에서의 효율을 현저히 향상시킬 수 있다.

[309]

[310] 전술한 본 발명의 설명은 예시를 위한 것이며, 본 발명이 속하는 기술분야의 통상의 지식을 가진 자는 본 발명의 기술적 사상이나 필수적인 특징을 변경하지 않고서 다른 구체적인 형태로 쉽게 변형이 가능하다는 것을 이해할 수 있을 것이다. 그러므로 이상에서 기술한 실시 예들은 모든 면에서 예시적인 것이며 한정적이 아닌 것으로 이해해야만 한다. 예를 들어, 단일형으로 설명되어 있는 각 구성 요소는 분산되어 실시될 수도 있으며, 마찬가지로 분산된 것으로 설명되어 있는 구성 요소들도 결합된 형태로 실시될 수 있다.

[311] 본 발명의 범위는 후술하는 특허청구범위에 의하여 나타내어지며, 특허청구범위의 의미 및 범위 그리고 그 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태가 본 발명의 범위에 포함되는 것으로 해석되어야 한다.

[312]

[313] <부호의 설명>

[314] 10 : 가공대상

[315] 110 : 가공부

[316] 111 : 공구

[317] 112 : 반사체

[318] 120 : 로봇

[319] 121 : 힘센서

[320] 130 : 제어부

[321] 200 : 레이저 트래커

청구범위

[청구항 1] 레이저 트래커가 로봇에 결합되어 공구를 구비하는 가공부로 레이저를 조사하여 상기 공구의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 측정하는 제1단계;
가공대상에 따라 사전에 설정된 상기 공구의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할하고, 상기 참조가공경로 상 상기 공구의 위치와 방향인 참조위치와 참조방향을 설정하는 제2단계;
상기 복수 개의 직선 중 상기 실제위치에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치를 통과하는 2개의 직선 각각과 상기 실제위치를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 상기 공구의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치를 도출하는 제3단계;
상기 최근접참조위치에서의 상기 참조방향과 상기 실제방향을 이용하여 상기 공구의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향을 도출하는 제4단계; 및
상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향을 이용하여 상기 로봇을 제어함으로써 상기 공구의 위치와 방향을 제어하는 제5단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 2] 청구항 1에 있어서,
상기 제2단계에서, 상기 복수 개의 직선은 상기 참조가공경로가 보간기(interpolator)에 의해 분할되어 형성되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 3] 청구항 1에 있어서,
상기 제3단계에서, 상기 2개의 직선은, 상기 최근접참조위치에 인접한 2개의 참조위치 각각과 상기 최근접참조위치를 연결하여 형성되는 제1연결직선 및 제2연결직선을 포함하는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 4] 청구항 3에 있어서,
상기 실제위치로부터 상기 제1연결직선으로 연결되는 제1수직연결선과 상기 제1연결직선의 교점인 제1투영점 및, 상기 실제위치로부터 상기 제2연결직선으로 연결되는 제2수직연결선과 상기 제2연결직선의 교점인 제2투영점이 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 5] 청구항 4에 있어서,
상기 제1연결직선과 상기 제2연결직선 각각에 대한 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 각각의 위치에 따라 상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향이 결정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 6] 청구항 5에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 상기 최근접참조위치가 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 7] 청구항 6에 있어서,
상기 제4단계에서, 상기 윤곽기준방향은, 상기 최근접참조위치에서의 참조방향인 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 8] 청구항 5에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제2투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 9] 청구항 5에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 10] 청구항 5에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 중 상기 실제위치에 더 근접한 투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 11] 복수 개의 링크와 복수 개의 관절을 구비하여 구동하는 로봇, 상기 로봇의 말단과 결합하고 공구를 구비하여 가공대상에 대한 가공을 수행하는 가공부 및, 상기 공구가 상기 가공대상에 대한 작업 시, 상기 로봇의 자세를 제어하는 제어부를 마련하는 제1단계;
상기 로봇의 자세에 따라 가변하는 상기 복수 개의 관절 각각에 대한 강성값인 강성데이터와 상기 공구에 작용되는 힘인 절삭력에 대한 정보를 이용함으로써, 상기 공구에 대해 연산된 가공오차인 컴플라이언스오차를 연산하여 도출하는 제2단계;
가공대상에 따라 사전에 설정된 상기 공구의 가공경로인 참조가공경로 상 상기 공구의 위치 및 방향인 참조위치 및 참조방향, 그리고, 상기 컴플라이언스오차를 이용하여, 상기 공구의 실시간 위치와 방향인 실제위치와 실제방향을 측정하는 제3단계;
가공대상에 따라 사전에 설정된 상기 공구의 가공경로인 참조가공경로를 복수 개의 직선으로 분할하는 제4단계;

상기 복수 개의 직선 중 상기 실제위치에 가장 근접한 참조위치인 최근접참조위치를 통과하는 2개의 직선 각각과 상기 실제위치를 수직 연결한 2개의 수직연결선을 이용하여, 상기 공구의 위치 오차를 보정한 위치인 윤곽기준위치를 도출하는 제5단계;

상기 최근접참조위치에서의 상기 참조방향과 상기 실제방향을 이용하여 상기 공구의 방향 오차를 보정한 방향인 윤곽기준방향을 도출하는 제6단계; 및

상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향을 이용하여 상기 로봇을 제어함으로써 상기 공구의 위치와 방향을 제어하는 제7단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 12] 청구항 11에 있어서,

상기 제2단계에서, 상기 컴플라이언스오차(Δx)는 하기의 수학식에 의해 도출되며, Δx는 컴플라이언스오차이고, C_x는 데카르트 컴플라이언스 행렬이며, Φ는 절삭력이고, C_0는 상기 로봇의 관절에 대한 컴플라이언스 행렬이며, J는 자코비안 행렬이고, T는 전치행렬인 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

$$\Delta x = C_x \Phi = J C_\theta J^T \Phi$$

[청구항 13] 청구항 11에 있어서,

상기 제4단계에서, 상기 복수 개의 직선은 상기 참조가공경로가 보간기(interpolator)에 의해 분할되어 형성되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 14] 청구항 11에 있어서,

상기 제5단계에서, 상기 2개의 직선은, 상기 최근접참조위치에 인접한 2개의 참조위치 각각과 상기 최근접참조위치를 연결하여 형성되는 제1연결직선 및 제2연결직선을 포함하는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 15] 청구항 14에 있어서,

상기 실제위치로부터 상기 제1연결직선으로 연결되는 제1수직연결선과 상기 제1연결직선의 교점인 제1투영점 및, 상기 실제위치로부터 상기 제2연결직선으로 연결되는 제2수직연결선과 상기 제2연결직선의 교점인 제2투영점이 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 16] 청구항 15에 있어서,

상기 제1연결직선과 상기 제2연결직선 각각에 대한 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 각각의 위치에 따라 상기 윤곽기준위치와 상기 윤곽기준방향이 결정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

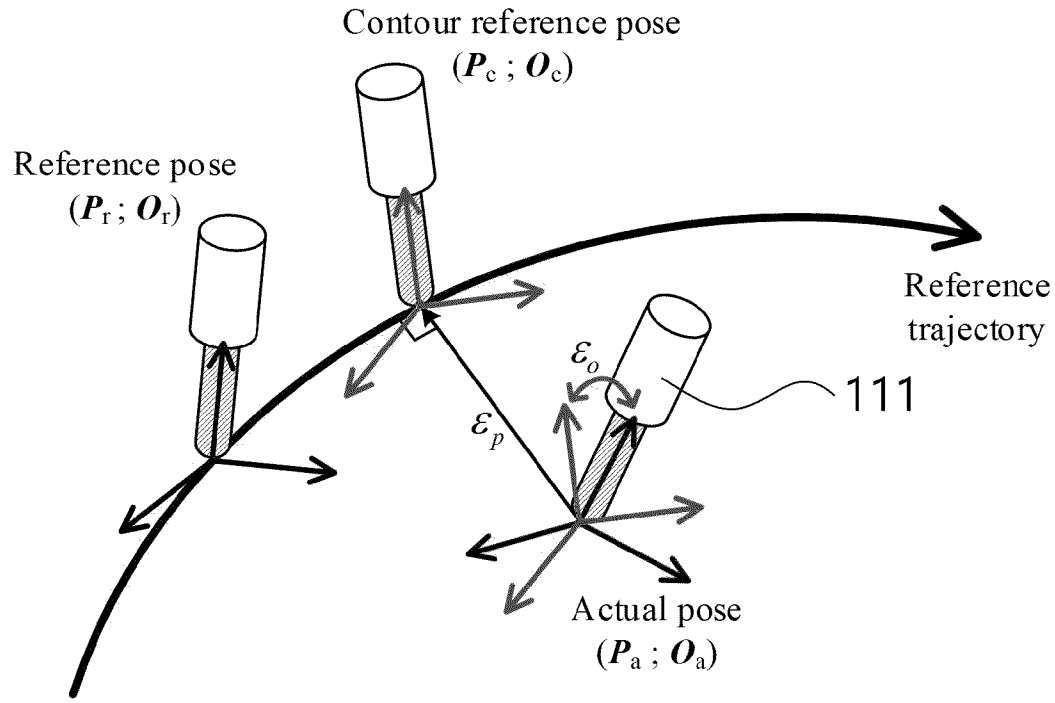
[청구항 17] 청구항 16에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 상기 최근접참조위치가 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 18] 청구항 16에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선의 연장선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제2투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

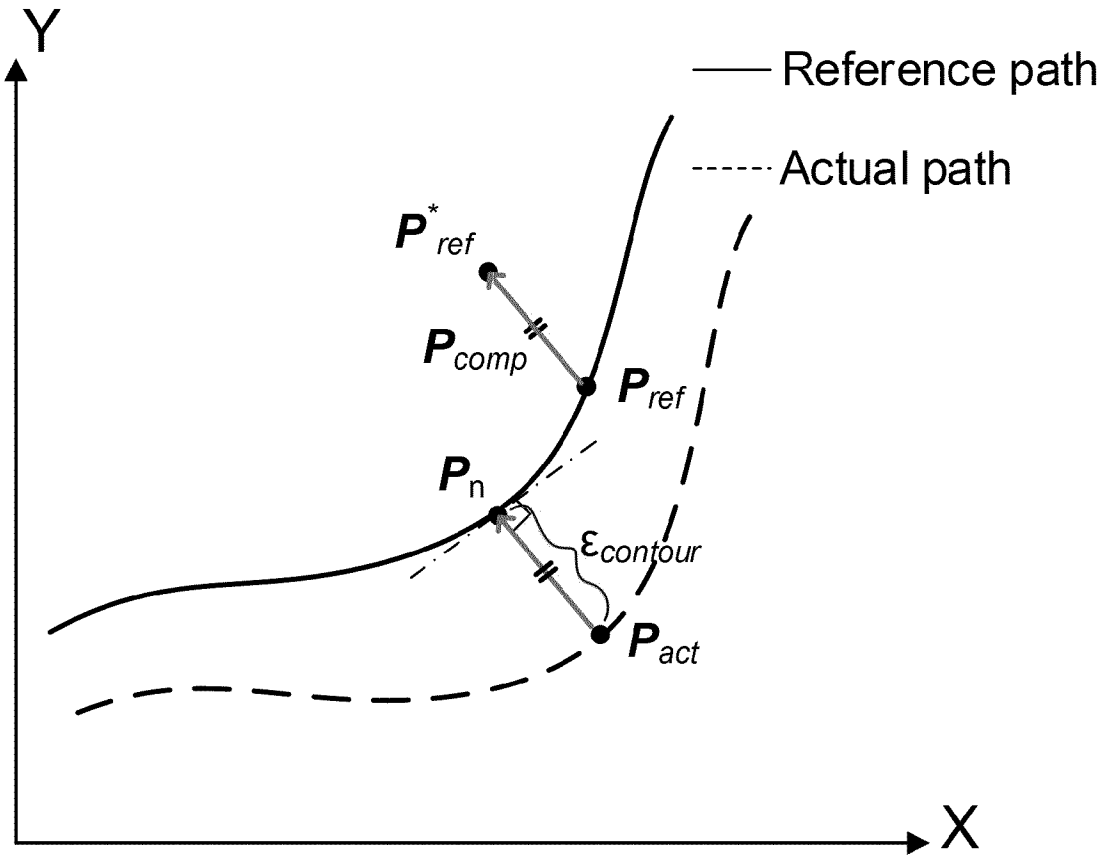
[청구항 19] 청구항 16에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선의 연장선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

[청구항 20] 청구항 16에 있어서,
상기 제1투영점이 상기 제1연결직선 상에 위치하고 상기 제2투영점이 상기 제2연결직선 상에 위치하는 경우, 상기 제1투영점과 상기 제2투영점 중 상기 실제위치에 더 근접한 투영점이 상기 윤곽기준위치로 설정되는 것을 특징으로 하는 윤곽제어 알고리즘을 이용한 로봇 제어 방법.

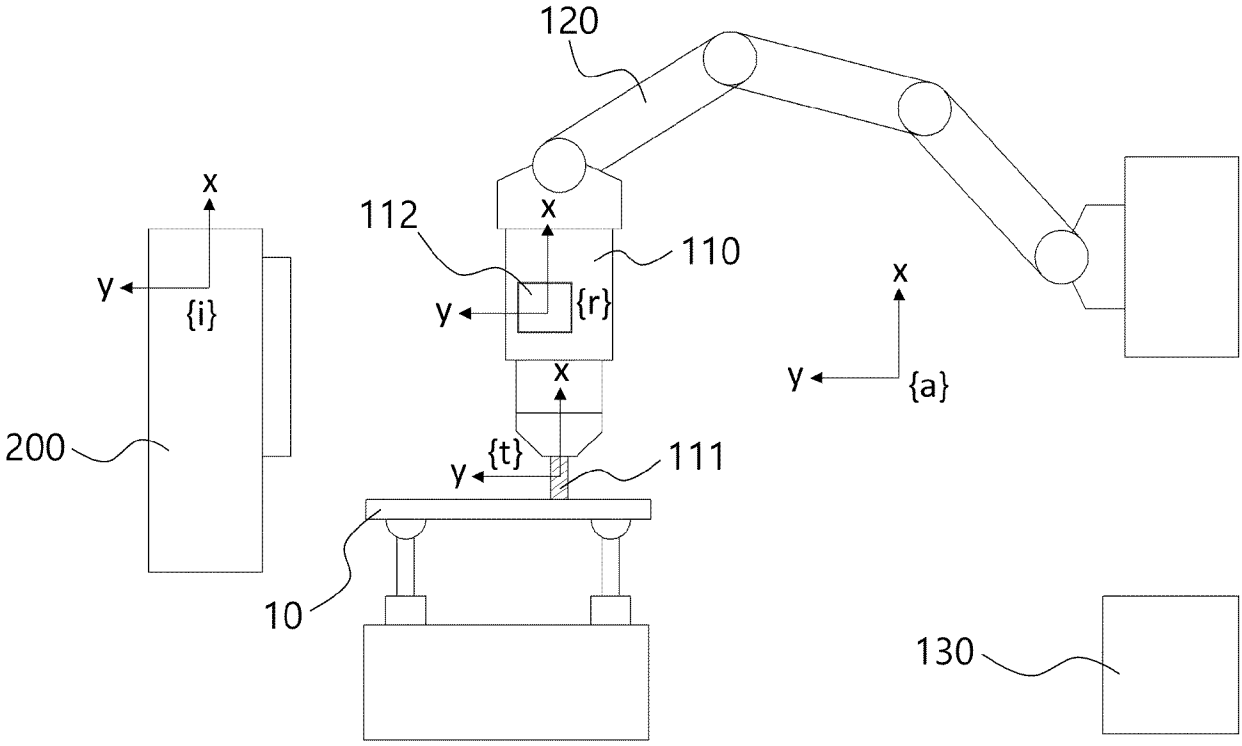
[도1]


Contour reference pose
(P_c ; O_c)
Reference pose
(P_r ; O_r)
Reference
trajectory
ε_o
ε_p
111
Actual pose
(P_a ; O_a)

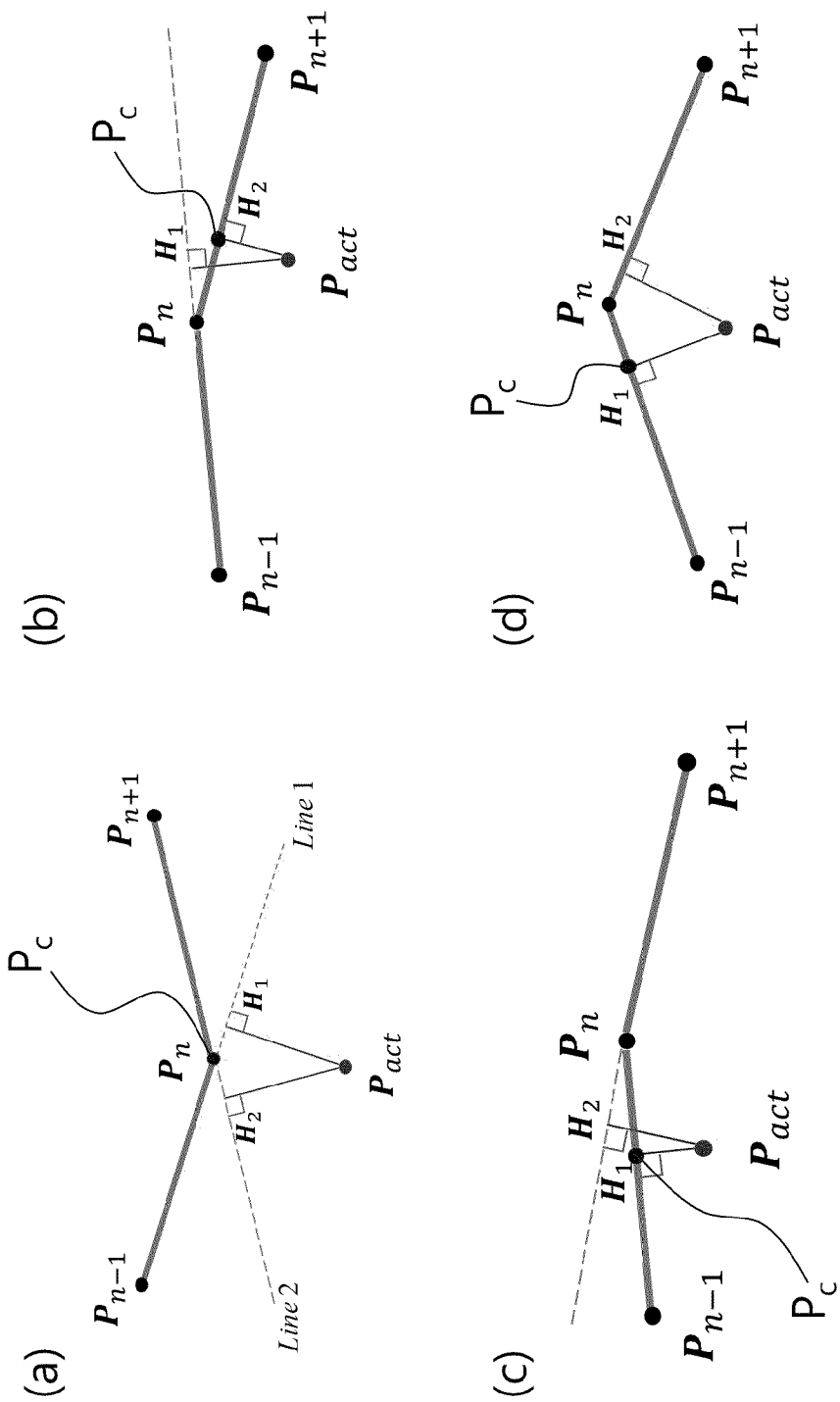
[도2]


Y
Reference path
Actual path
P^*_{ref}
P_{comp}
P_{ref}
P_n
$\varepsilon_{contour}$
P_{act}
X

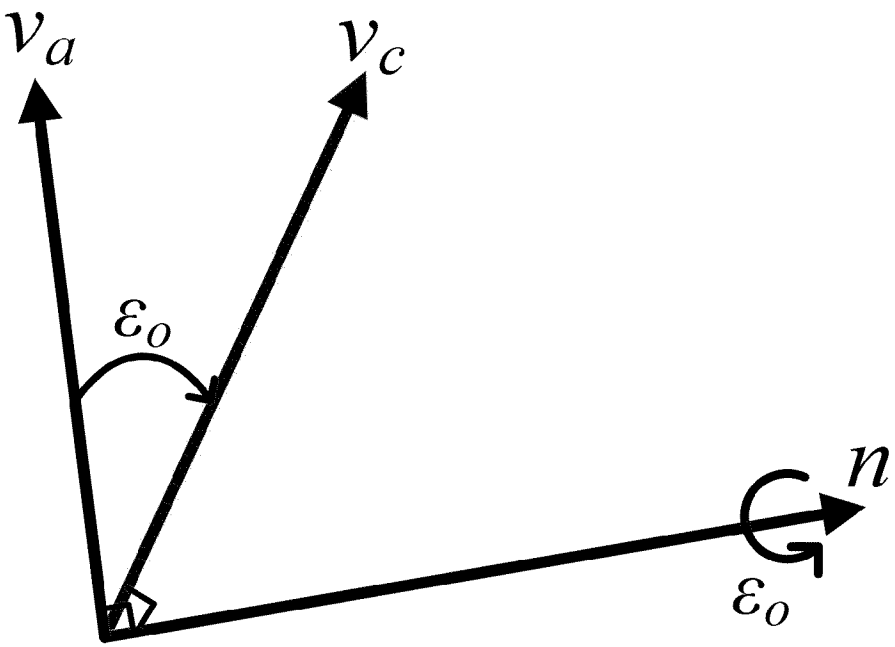
[도3]



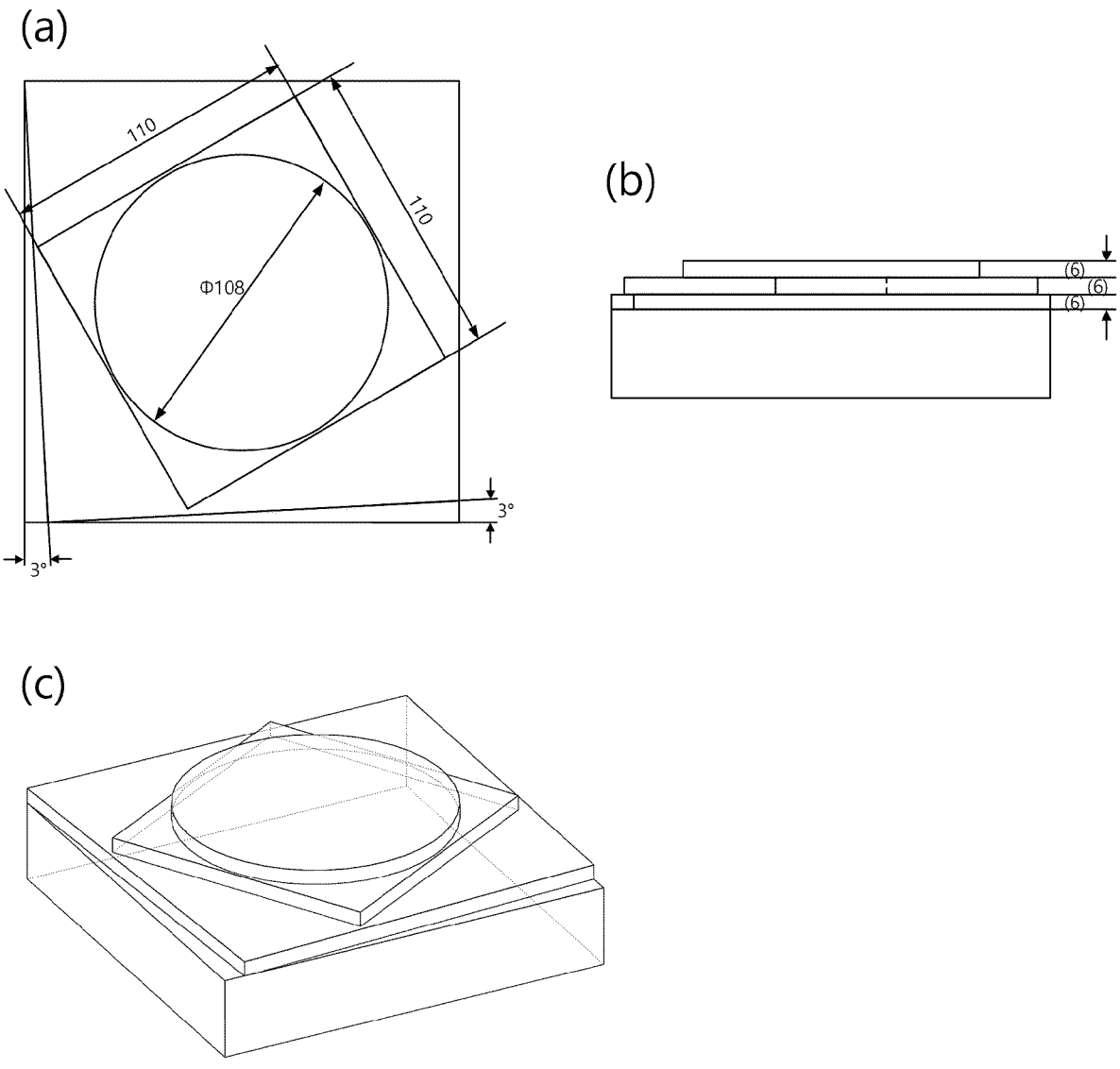
[도4]



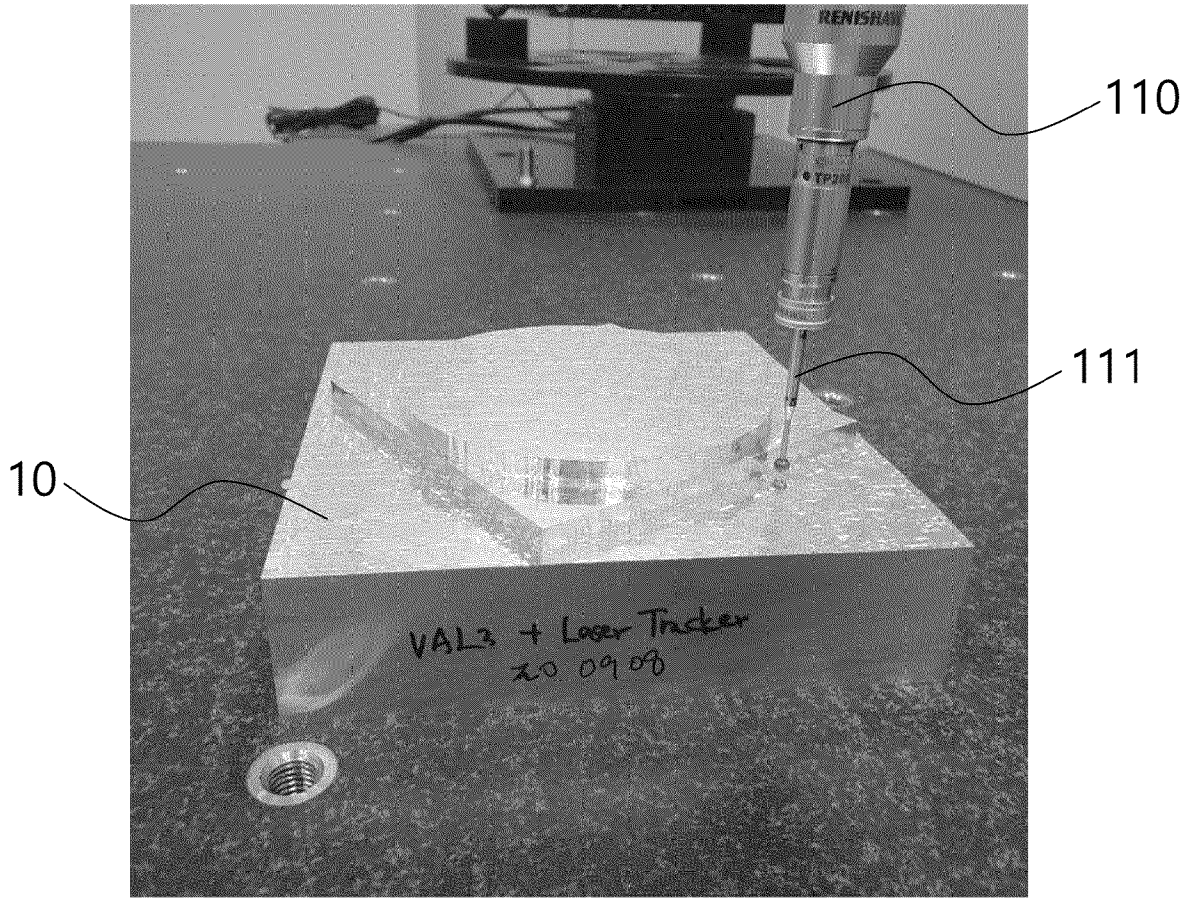
[도5]



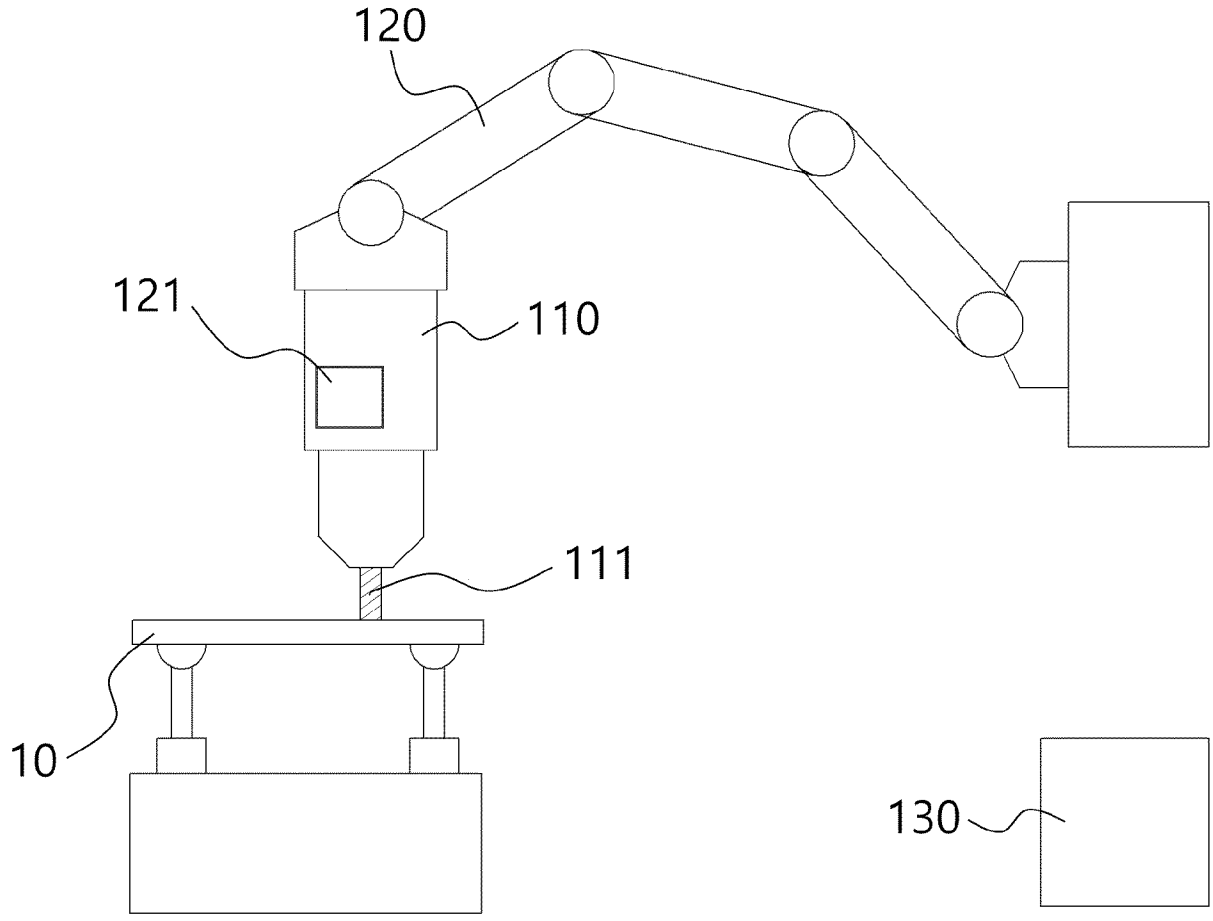
[도6]



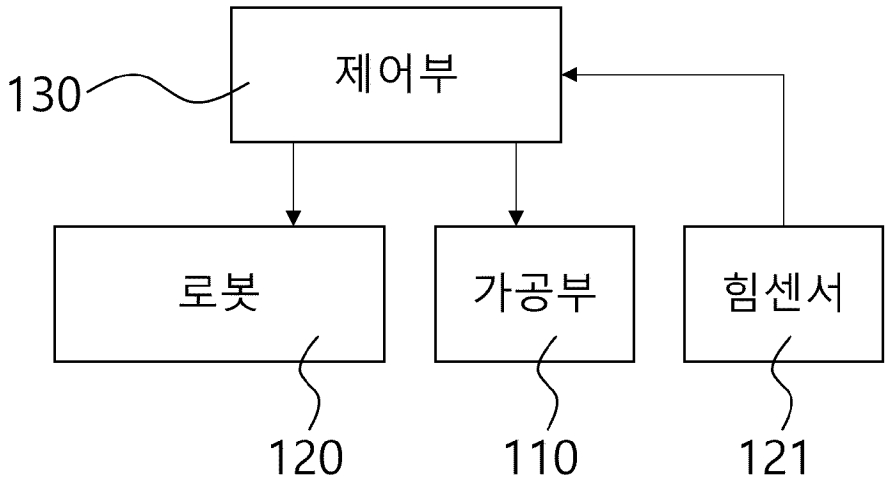
[도7]



[도8]



[도9]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/KR2021/013384

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B25J 9/16(2006.01)i; **B25J 11/00**(2006.01)i; **B25J 9/06**(2006.01)i; **B25J 13/08**(2006.01)i; **B25J 19/02**(2006.01)i; **B23Q 17/22**(2006.01)i; **G05B 19/19**(2006.01)i; **G05B 19/402**(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

B25J 9/16(2006.01); B23Q 17/00(2006.01); B25J 13/08(2006.01); B25J 19/00(2006.01); B25J 9/22(2006.01); G05B 19/19(2006.01); G05B 19/42(2006.01)

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Korean utility models and applications for utility models: IPC as above
Japanese utility models and applications for utility models: IPC as above

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

eKOMPASS (KIPO internal) & keywords: 로봇(robot), 가공(machining), 레이저 트래커(laser tracker), 관절(joint), 강성(stiffness), 힘센서(force sensor), 윤곽(contour)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2020-049633 A (MITSUBISHI HEAVY IND. LTD.) 02 April 2020 (2020-04-02) See paragraphs [0025], [0031], [0050] and [0052] and figures 1 and 8.	1-20
A	JP 2017-505240 A (TYCO ELECTRONICS (SHANGHAI) CO., LTD. et al.) 16 February 2017 (2017-02-16) See paragraphs [0030]-[0032] and figure 1.	1-20
A	US 9110456 B2 (ZHANG et al.) 18 August 2015 (2015-08-18) See column 4, line 47 - column 5, line 31, column 6, line 21 - column 7, line 18 and column 10, lines 6-16, claim 1 and figures 1-3 and 7.	1-20
A	KR 10-2017-0016631 A (KOREA ELECTROTECHNOLOGY RESEARCH INSTITUTE) 14 February 2017 (2017-02-14) See paragraphs [0033] and [0035] and figure 3.	1-20

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
15 June 2022	**16 June 2022**

Name and mailing address of the ISA/KR	Authorized officer
Korean Intellectual Property Office **Government Complex-Daejeon Building 4, 189 Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon 35208**	
Facsimile No. **+82-42-481-8578**	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/KR2021/013384

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	KR 10-2019-0114749 A (NIDEC CORPORATION) 10 October 2019 (2019-10-10) See paragraphs [0013], [0034] and [0038] and figure 1.	1-20

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/KR2021/013384

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
JP	2020-049633	A	02 April 2020	US	2021-0299861	A1	30 September 2021
				WO	2020-066102	A1	02 April 2020
JP	2017-505240	A	16 February 2017	CN	104827480	A	12 August 2015
				EP	3105016	A1	21 December 2016
				EP	3105016	B1	25 March 2020
				JP	6505729	B2	24 April 2019
				MX	2016010485	A	31 October 2016
				US	10112301	B2	30 October 2018
				US	2016-0346932	A1	01 December 2016
				WO	2015-121767	A1	20 August 2015
US	9110456	B2	18 August 2015	US	2006-0048364	A1	09 March 2006
KR	10-2017-0016631	A	14 February 2017	WO	2017-022893	A1	09 February 2017
KR	10-2019-0114749	A	10 October 2019	CN	110315530	A	11 October 2019
				JP	2019-177450	A	17 October 2019
				US	11273554	B2	15 March 2022
				US	2019-0299418	A1	03 October 2019

국 제 조 사 보 고 서

국제출원번호
PCT/KR2021/013384

A. 발명이 속하는 기술분류(국제특허분류(IPC))

B25J 9/16(2006.01)i; **B25J 11/00**(2006.01)i; **B25J 9/06**(2006.01)i; **B25J 13/08**(2006.01)i; **B25J 19/02**(2006.01)i; **B23Q 17/22**(2006.01)i; **G05B 19/19**(2006.01)i; **G05B 19/402**(2006.01)i

B. 조사된 분야

조사된 최소문헌(국제특허분류를 기재)

B25J 9/16(2006.01); B23Q 17/00(2006.01); B25J 13/08(2006.01); B25J 19/00(2006.01); B25J 9/22(2006.01); G05B 19/19(2006.01); G05B 19/42(2006.01)

조사된 기술분야에 속하는 최소문헌 이외의 문헌

한국등록실용신안공보 및 한국공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC
일본등록실용신안공보 및 일본공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC

국제조사에 이용된 전산 데이터베이스(데이터베이스의 명칭 및 검색어(해당하는 경우))

eKOMPASS(특허청 내부 검색시스템) & 키워드: 로봇(robot), 가공(machining), 레이저 트래커(laser tracker), 관절(joint), 강성(stiffness), 힘센서(force sensor), 윤곽(contour)

C. 관련 문헌

카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
A	JP 2020-049633 A (MITSUBISHI HEAVY IND. LTD.) 2020.04.02 단락 [0025], [0031], [0050], [0052] 및 도면 1, 8	1-20
A	JP 2017-505240 A (TYCO ELECTRONICS (SHANGHAI) CO., LTD. 등) 2017.02.16 단락 [0030]-[0032] 및 도면 1	1-20
A	US 9110456 B2 (ZHANG 등) 2015.08.18 컬럼 4, 라인 47 - 컬럼 5, 라인 31, 컬럼 6, 라인 21 - 컬럼 7, 라인 18, 컬럼 10, 라인 6-16, 청구항 1 및 도면 1-3, 7	1-20
A	KR 10-2017-0016631 A (한국전기연구원) 2017.02.14 단락 [0033], [0035] 및 도면 3	1-20
A	KR 10-2019-0114749 A (니혼 덴산 가부시키가이샤) 2019.10.10 단락 [0013], [0034], [0038] 및 도면 1	1-20

☐ 추가 문헌이 C(계속)에 기재되어 있습니다.

☑ 대응특허에 관한 별지를 참조하십시오.

* 인용된 문헌의 특별 카테고리:

"A" 특별히 관련이 없는 것으로 보이는 일반적인 기술수준을 정의한 문헌
"D" 본 국제출원에서 출원인이 인용한 문헌
"E" 국제출원일보다 빠른 출원일 또는 우선일을 가지나 국제출원일 이후에 공개된 선출원 또는 특허 문헌
"L" 우선권 주장에 의문을 제기하는 문헌 또는 다른 인용문헌의 공개일 또는 다른 특별한 이유(이유를 명시)를 밝히기 위하여 인용된 문헌
"O" 구두 개시, 사용, 전시 또는 기타 수단을 언급하고 있는 문헌
"P" 우선일 이후에 공개되었으나 국제출원일 이전에 공개된 문헌
"T" 국제출원일 또는 우선일 후에 공개된 문헌으로, 출원과 상충하지 않으며 발명의 기초가 되는 원리나 이론을 이해하기 위해 인용된 문헌
"X" 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌 하나만으로 청구된 발명의 신규성 또는 진보성이 없는 것으로 본다.
"Y" 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌이 하나 이상의 다른 문헌과 조합하는 경우로 그 조합이 당업자에게 자명한 경우 청구된 발명은 진보성이 없는 것으로 본다.
"&" 동일한 대응특허문헌에 속하는 문헌

국제조사의 실제 완료일	국제조사보고서 발송일
2022년06월15일(15.06.2022)	**2022년06월16일(16.06.2022)**

ISA/KR의 명칭 및 우편주소	심사관
대한민국 특허청 **(35208) 대전광역시 서구 청사로 189, 4동 (둔산동, 정부대전청사)**	**박태욱**
팩스 번호 **+82-42-481-8578**	전화번호 **+82-42-481-5560**

국 제 조 사 보 고 서
대응특허에 관한 정보

국제출원번호
PCT/KR2021/013384

국제조사보고서에서 인용된 특허문헌	공개일	대응특허문헌	공개일
JP 2020-049633 A	2020/04/02	US 2021-0299861 A1	2021/09/30
		WO 2020-066102 A1	2020/04/02
JP 2017-505240 A	2017/02/16	CN 104827480 A	2015/08/12
		EP 3105016 A1	2016/12/21
		EP 3105016 B1	2020/03/25
		JP 6505729 B2	2019/04/24
		MX 2016010485 A	2016/10/31
		US 10112301 B2	2018/10/30
		US 2016-0346932 A1	2016/12/01
		WO 2015-121767 A1	2015/08/20
US 9110456 B2	2015/08/18	US 2006-0048364 A1	2006/03/09
KR 10-2017-0016631 A	2017/02/14	WO 2017-022893 A1	2017/02/09
KR 10-2019-0114749 A	2019/10/10	CN 110315530 A	2019/10/11
		JP 2019-177450 A	2019/10/17
		US 11273554 B2	2022/03/15
		US 2019-0299418 A1	2019/10/03