

## 다축 동기 제어 방법 기반의 산업용 고속 병렬로봇 제어

도현민<sup>a\*</sup>, 김병인<sup>a</sup>, 박찬훈<sup>a</sup>, 경진호<sup>a</sup>Synchronization Error-based Control Approach for  
an Industrial High-speed Parallel RobotHyun Min Do<sup>a\*</sup>, Byung In Kim<sup>a</sup>, Chanhun Park<sup>a</sup>, Jin Ho Kyung<sup>a</sup><sup>a</sup> Department of Robotics and Mechatronics, Korea Institute of Machinery and Materials  
156, Gajeongbuk-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34103, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	2	September	2016
Revised	13	October	2016
Accepted	14	October	2016

## Keywords:

High-speed parallel robot  
Synchronization  
Ball joint  
Tracking control

## ABSTRACT

Parallel robots are usually used for performing pick-and-place motion to increase productivity in high-speed environments. The present study proposes a high-speed parallel robot and a control approach to improve the tracking performance for the purpose of handling a solar cell. However, the target processes are not limited to the solar cell-handling field. Therefore, a delta-type parallel manipulator is designed, and a ball joint structure is specifically proposed to increase the allowed angle that would meet the required workspace. A control algorithm considering the synchronization between multiple joints in a closed-chain mechanism is also suggested to improve the tracking performance, where the tracking and synchronization errors are simultaneously considered. In addition, a prototype machine with the proposed ball joint is implemented. A satisfactory tracking performance is achieved by applying the proposed control algorithm, with a cycle time of 0.3 s for a 0.1 kg payload.

## 1. 서론

병렬로봇은 초기에는 스투어트(stewart) 플랫폼, 헥사포드 플랫폼 등 다양한 형태로 개발되었으며, 1990년대 중반부터 본격적으로 가공기계 용도의 연구개발이 진행되었다. 현재는 주로 고속으로 부품을 핸들링하는 용도로 개발되어 식품 분야 등에서 폭넓게 적용이 되고 있다. 병렬형 로봇의 장점은 작은 이동부 질량으로 속도 및 가속도를 높여서 높은 이송속도를 실현가능하게 하고 여러 연결 링크의 트러스 구조로 고강성을 구현할 수 있는 것으로, 산업현장에서 주로 고속 또는 고가반 하중이 요구되는 작업

들에 사용되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 이러한 병렬로봇을 고속/고정밀 작업에 사용하기 위해서는 로봇 메커니즘의 설계와 로봇 제어기의 설계 두 가지 측면이 모두 중요하다. 병렬로봇의 메커니즘 설계와 제어 방법에 관하여 다양한 연구가 이루어져 왔는데, 메커니즘 설계 측면에서는 다양한 기구 메커니즘의 설계에 관한 연구가 이루어져 왔고<sup>[3-5]</sup>, 제어 측면에서는 축별 독립 제어 방법을 포함하여 평면 병렬 기구의 동기화 제어 방법 등에 관한 연구가 이루어져 왔다<sup>[6-11]</sup>.

본 논문에서는 기구적 측면에서는 로봇의 작업공간 확대를 위한 볼 조인트 설계 방법과 제어 정밀도 향상을 위한 동기화 오차

\* Corresponding author. Tel.: +82-42-868-7507

Fax: +82-42-868-7135

E-mail address: hmdo@kimm.re.kr (Hyun Min Do).

기반의 제어 알고리즘을 제안하였다. 병렬로봇의 제어 관점에서 기존에는 주로 각 축을 독립적으로 제어하는 방법이 많이 사용되어 왔는데, 이 경우 각각의 축이 주어진 기준 궤적을 추종하도록 제어 알고리즘이 구성되어 있어 다른 축의 추종 오차를 고려할 수가 없다. 하지만 병렬로봇은 기구적 특성상 다축 간에 서로 영향을 주도록 되어 있으므로 정밀한 제어를 위하여 다른 축의 추종 오차가 고려되어야 한다.

본 논문은 병렬로봇의 추종 성능 향상을 위한 제어 방법으로 동기화 오차 기반의 방법을 제시하고 있다. 각 축에서 발생하는 추종 오차의 축별 차이를 동기화 오차로 정의하고, 동기화 오차와 각 축별 추종 오차를 결합하여 새롭게 결합오차를 정의하였다. 그리고 이 결합오차를 PID 제어기의 피드백 오차로 사용하여 결합오차를 최소화하도록 하여, 추종 오차와 동기화 오차를 모두 최소화되도록 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 볼 조인트 설계 방법을 포함한 병렬로봇 프로토타입의 설계와 구현에 대하여 기술하고, 3장에서는 결합오차를 사용한 제어 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 제안한 방법의 성능 검증을 위한 시뮬레이션 결과와 개발한 프로토타입 로봇을 적용한 실험 결과를 제시한다. 끝으로 5장에서 결론에 대하여 논하였다.

## 2. 병렬로봇 프로토타입 설계

본 논문은 3 자유도를 가지는 델타형 병렬로봇을 대상으로 하고 있다. 델타형 병렬로봇은 ABB사<sup>[12]</sup>에 의하여 상용화된 로봇으로 지금은 특허권이 만료되어 Fanuc, Yaskawa 및 Mitsubishi 등 주요 로봇업체를 포함한 다양한 기업들이 제품을 출시하고 있다. 전체적인 구조는 Fig. 1과 같다.

### 2.1 병렬로봇 메커니즘 설계

로봇의 몸체에 해당하는 베이스 구조물은 높은 강성이 요구되는

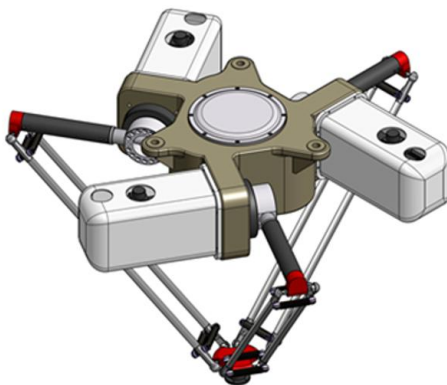


Fig. 1 Structure of the considered parallel robot

부분으로, 일관된 생산 품질 유지를 위하여 주조방법을 사용하도록 하였다. 로봇의 베이스 플랫폼과 말단의 이동부(moving platform)는 세 개의 암(arm)으로 연결이 되어 있는데 각각의 암은 2개의 링크로 구성되어 있다. 내부 암은 첫 번째 링크로 로봇 베이스에 장착된 모터와 연결되는 것으로 높은 강성이 요구되는 부분이고, 외부 암은 두 번째 링크로 평행사변형 구조를 가지고 있다. 외부 암과 말단 이동부는 볼 조인트로 연결이 되는데 로봇의 작업공간을 결정하는 것은 링크의 길이와 볼 조인트의 허용 각도가 주요한 파라미터이다. 따라서 로봇의 작업공간을 넓히기 위해서는 볼 조인트의 허용 각도가 중요한데, 기존의 상용 제품은 필요한 허용 각도를 만족시키지 못하므로 본 논문에서는 볼 조인트를 새롭게 설계하였다. 말단 이동부는 세 개의 암이 모여서 폐회로 체인을 구성하는 곳으로 특정 작업을 위하여 필요한 틀을 장착하게 된다.

설계한 병렬로봇은 다음과 같은 사양을 가지고 있다. 전체적인 무게는 165 kg이고 로봇 베이스의 반경은 256 mm, 이동부의 반경은 50 mm이다. 첫 번째와 두 번째 링크의 길이는 각각 374 mm와 880 mm이고, 최종적으로 확보된 작업공간은 650 mm+500 mm로 Fig. 2와 같다.

### 2.2 볼 조인트 설계

필요한 작업공간을 달성하기 위하여 이에 필요한 각 조인트의 이동 범위를 분석할 필요가 있다. 설계한 병렬로봇의 조인트는 첫 번째 링크와 모터를 연결하는 능동 조인트와, 첫 번째 링크와 두 번째 링크를 연결하는 수동 조인트로 나누어지는데, 능동 조인트의 경우 모터에 의하여 직접 제어되는 부분으로 기구적 간섭만 없으면 필요한 범위를 모두 달성할 수 있다. 작업공간 해석 결과 첫 번째 조인트의 경우 25°에서 130° 범위의 이동이 필요했고, 이는 모터에 의하여 달성가능하다. 수동 조인트의 경우는 볼 조인트의 허용 각도에 의하여 결정이 된다. 실제로 볼 조인트의 모션은 방향성이

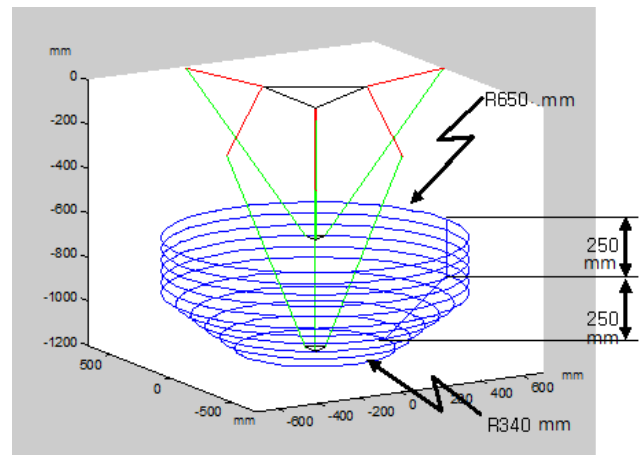
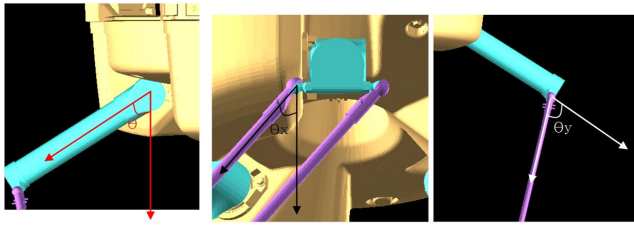


Fig. 2 Workspace of the designed prototype parallel robot



(a) Active joint in first link (b) Passive joint in second link

Fig. 3 Angle of active and passive joints

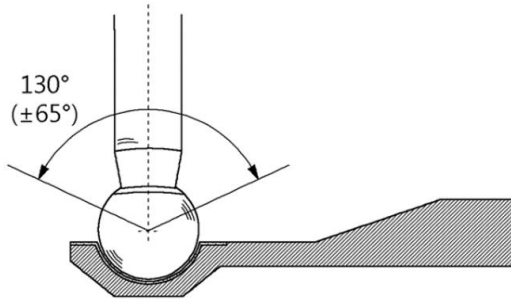


Fig. 4 Designed ball joint and allowed angle

없지만 링크와의 기구적 간섭으로 인하여 Fig. 3과 같이 x축과 y축의 2 자유도 모션으로 이루어진다. Fig. 3에서 보듯이 y축 모션( $\theta_y$ )은 360°가 가능하므로 제한이 없다. 결국 x축 모션( $\theta_x$ )의 허용 범위에 의하여 결정이 되는데, 필요한 작업공간 조건에서 도출된 x축 방향의 요구조건은  $\pm 65^\circ$  ( $|\theta_x| \geq 65^\circ$ )이다. 기존의 볼 조인트는 이러한 요구조건을 만족시킬 수 있는 것이 없으므로 본 연구에서는 새롭게 볼 조인트를 설계하였다.

볼 조인트는 볼 홀더와 볼로 구성이 되는데 본 논문의 볼 조인트 설계의 핵심 개념은 Fig. 4와 같이 볼 홀더의 높이를 낮추어 허용 각도를 확장하는 것이다. 이 경우 볼 홀더가 볼의 중심보다 낮아지게 되면 기구적인 제한이 없어지므로 볼과 볼 홀더가 분리되는 문제점이 발생하는데, 이 문제는 볼 홀더가 장착되어 있는 두 번째 링크의 평행사변형 구조를 연결하는 스프링의 탄성력을 증가시켜서 볼과 볼 홀더가 일정 값 이하에서 분리되지 않도록 하였다. 또한 이렇게 될 경우 볼과 볼 홀더간의 윤활을 위한 윤활제가 누출되는 문제점이 발생할 수 있는데, 별도의 윤활제를 사용하지 않고 볼 홀더부에 테프론 코팅을 하여 윤활 문제를 해결하였다. 이 때 필요한 윤활 특성과 내구성을 유지하기 위하여 코팅층의 두께를 적절히 설정하여야 한다. 테프론은 여러 종류 중 최고 강도의 테프론인 ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) 코팅을 하였고 내마모성과 수명을 고려하여 동메쉬에 테프론 코팅을 함으로써 볼 조인트의 내구성을 극대화하였다. 또한 내구성을 고려하면 코팅층은 가능한 한 두껍게 형성하는 것이 좋으나 제작성을 고려하여 적절한 정도를 확보하도록 하였다. 제작한 볼 조인트의 볼과 볼 홀더는 Fig. 5와 같다.



Fig. 5 Proposed ball joint (a ball and a ball holder)

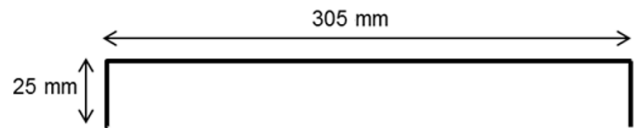


Fig. 6 Adept cycle motion

### 2.3 구조 해석

설계한 병렬로봇에 대하여 ANSYS를 이용한 유한요소해석을 수행하여 구조 해석을 진행하였다. 구조 해석 결과 구조의 강긴함을 확인할 수 있었다. 상세한 구조 해석 결과는 참고문헌<sup>[13]</sup>을 참고하기 바란다.

### 2.4 구동부 사양 도출

병렬로봇이 주로 수행하는 픽 앤 플레이스(pick-and-place) 작업에 필요한 구동부의 사양을 선정하기 위하여 병렬로봇의 성능테스트 지표로 널리 사용되는 어댑트 사이클(adept cycle) 모션을 사용하였다. 어댑트 사이클은 Fig. 6과 같이 25 mm 수직 상승, 305 mm 수평 이동, 25 mm 수직 하강 후 반복하는 궤적으로 구성되어 있다.

우선 각 조인트에서 요구되는 최대 토크 및 속도를 도출하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 첫 번째로 300 mm의 수평 이동을 하는 직선 운동을 구현하였고, 이 때 속도는 초당 5 사이클로 하였다. 이 경우 요구되는 최대 속도는 190 rpm으로 계산되었다. 다음으로 6 kg 부하를 부착하고 초당 3 사이클의 속도로 동일한 운동을 구현하였다. 이 경우 최대 요구 토크는 200 Nm로 계산되었다. Fig. 7은 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 이 시뮬레이션 결과에 기반하여 모터와 감속기 등의 구동부 사양을 결정하였다. 구현된 프로토타입 병렬로봇은 Fig. 8과 같다.

## 3. 다축 동기화 방식 제어 알고리즘

### 3.1 역기구학 해석

제안한 병렬로봇의 구조는 크게 베이스 플랫폼, 이동부(무빙 플랫폼) 그리고 세 개의 암으로 구성되어 있고, 링크  $B_iA_i$  ( $i =$

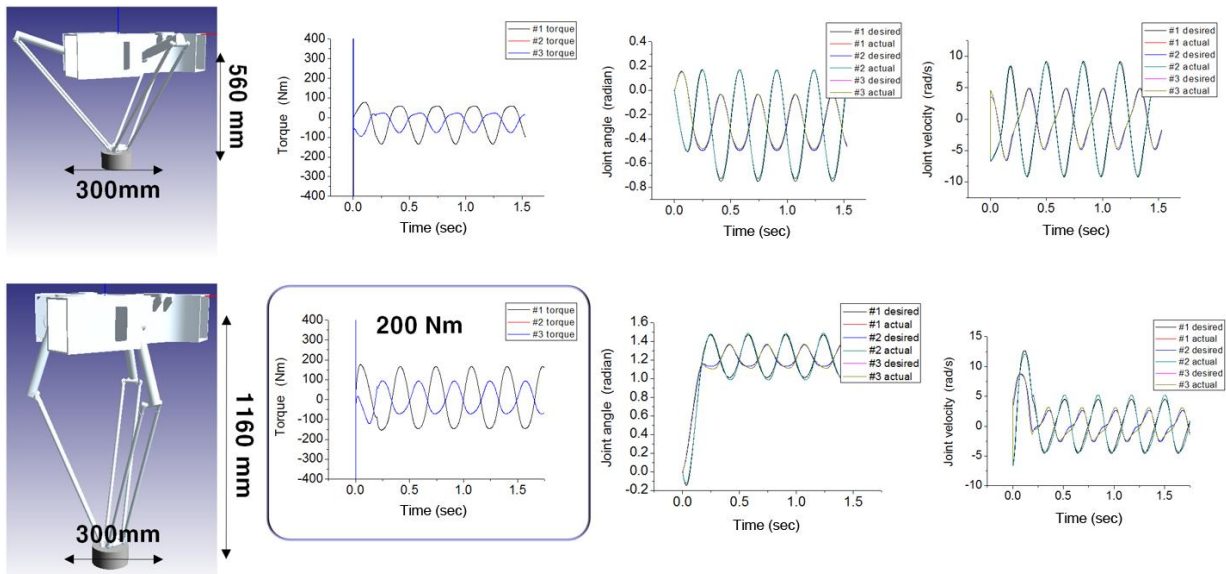


Fig. 7 Linear motion simulation with the speed of 3 cycles/sec and 6 kg payload

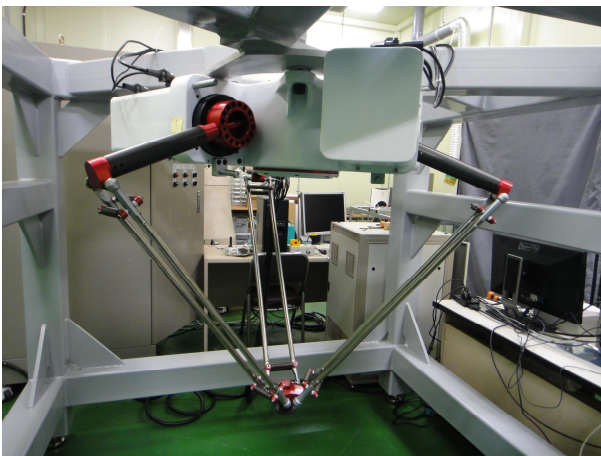


Fig. 8 Prototype parallel robot

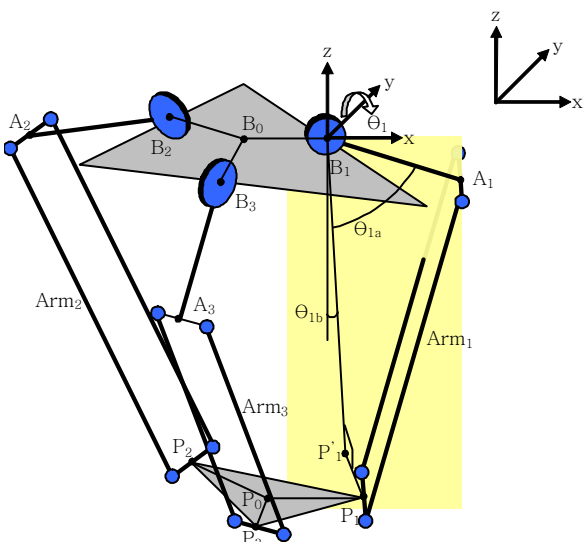


Fig. 9 Structure of the designed parallel robot

1,2,3)의 회전으로 이동부의 위치가 결정된다 (Fig. 9 참조). 따라서 역기구학 해석은 이동부 중심  $P_0$ 의 위치  $(x_0, y_0, z_0)$ 가 주어졌을 때 능동 조인트  $B_i$ 의 회전각  $\theta_i$ 를 계산하는 것이다. Fig. 9로부터 다음 식 (1)이 성립한다.

$$\vec{B_i P_i} = -\vec{B_0 B_i} + \vec{B_0 P_0} + \vec{P_0 P_i}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (1)$$

여기서  $\vec{B_0 P_0} = (x_0, y_0, z_0)$ 는 주어진 값이고,  $\vec{B_0 B_i}$ ,  $\vec{P_0 P_i}$ 은 설계 파라미터로 결정된 값이다. 또한  $\theta_i$ 는 첫 번째 링크  $B_i A_i$ 와  $-z$ 축 간의 각도로  $\theta_{ia}$ 와  $\theta_{ib}$ 의 합으로 표현된다. 여기서  $\Pi_i$ 를  $B_i$ 의 회전으로 만들어지는 평면, 그리고  $P'_i$ 을  $P_i$ 의  $\Pi_i$  평면으로의 투영점이라고 하면,  $\Pi_i$ 의 단위 법선벡터는 식 (2)로 표현된다.

$$\vec{N_i} = \frac{(\vec{B_0 B_i} \times [001])}{\|\vec{B_0 B_i} \times [001]\|}. \quad (2)$$

여기서  $\vec{B_0 B_i}$ 과  $\vec{B_i A_i}$ 이 동일한 방향을 가지는 벡터이므로  $\vec{B_0 B_i}$  대신  $\vec{B_i A_i}$ 가 사용되었다. 그러면  $\vec{P_i P_i}$ 의 길이  $l_i$ 는  $l_i = \|\vec{B_i P_i}\|$ 로 표현할 수 있고,  $\vec{P_i P_i} = l_i \vec{N_i}$ 이다. 또한  $\theta_{ia}$ 는  $\angle A_i B_i P'_i$ 이고  $\theta_{ib}$ 는  $\vec{B_i P_i}$ 과  $-z$ 축 간의 각도이다. 따라서

$$\theta_{ia} = \cos^{-1} \left( \frac{(\|\vec{A_i B_i}\|^2 + \|\vec{B_i P_i}\|^2 - \|\vec{A_i P_i}\|^2)}{2 \cdot \|\vec{A_i B_i}\| \cdot \|\vec{B_i P_i}\|} \right) \quad (3)$$

$$\theta_{ib} = \text{atan2}(\sqrt{\|\vec{B_i P_{ix}}\|^2 + \|\vec{B_i P_{iy}}\|^2}, -\|\vec{B_i P_{iz}}\|) \quad (4)$$

여기서  $\|\overrightarrow{A_i P_i}\| = \sqrt{\|A_i P_i\|^2 - \|P_i P_i\|^2}$  이고, 최종적으로 능동 조인트  $B_i$ 의 회전각  $\theta_i$ 는  $\theta_i = \theta_{ia} + \theta_{ib}$ 로 구해진다.

### 3.2 동기화 오차

다축 병렬로봇의 동기화를 위해서는 축간 오차의 편차를 최소화해야 할 필요가 있고, 이를 표현할 수 있는 동기화 오차를 정의하고자 한다.  $n$ 개의 구동부를 가지는 병렬로봇에서  $q_i (1 \leq i \leq n)$ 를  $i$ 번째 능동 조인트의 현재 위치,  $q_i^d (1 \leq i \leq n)$ 를  $q_i$ 가 추종해야 할 위치 명령이라고 하면, 추종 오차는 다음과 같이 기술된다.

$$e_i = q_i^d - q_i, 1 \leq i \leq n. \quad (5)$$

다축 동기화 개념에서  $i$ 번째 능동 조인트와 인접한 두 축( $i-1$ 번째 축,  $i+1$ 번째 축)간의 동기화 오차  $\epsilon_i$ 를 식 (6)과 같이 정의한다.

$$\epsilon_i = (e_i - e_{i-1}) + (e_i - e_{i+1}), 2 \leq i \leq n-1 \quad (6)$$

$$\epsilon_1 = (e_1 - e_n) + (e_1 - e_2), i = 1$$

$$\epsilon_n = (e_n - e_{n-1}) + (e_n - e_1), i = n$$

그리고 추종 오차와 동기화 오차를 결합한 결합오차를 식 (7)과 같이 정의한다.

$$e_i^{coupled} = e_i + \gamma \cdot \epsilon_i, 1 \leq i \leq n \quad (7)$$

여기서  $\gamma (0 \leq \gamma \leq 1)$ 는 전체 결합오차 중에서 동기화 오차의 비율을 결정하는 파라미터이다. 최종적으로 제어기의 피드백 입력 신호로 사용하는 것은 결합오차로 각 축의 추종 오차와 다축 간 동기화 정도를 표현하고 있다.

### 3.3 다축 동기화 방식 제어 알고리즘

본 논문에서는 병렬로봇의 추종 제어를 위해서 뒤먹임(feedback) 제어 방법인 PID 제어와 고속 모션에서 빠른 안정화를 위한

앞먹임(feedforward) 제어 방법을 사용하고 있다. 다축 동기화를 고려하지 않을 경우 피드백 신호로 각 축의 추종 오차를 사용하면 되지만 앞 절에서 기술하였듯이 병렬로봇의 기구적 특성상 축간 동기화가 중요하므로 추종 오차와 동기화 오차를 결합한 결합오차를 피드백 신호로 사용하였다. 또한 앞먹임 제어입력은 기준 궤적(위치, 속도 및 가속도 명령)을 사용하여 세틀링 타임 감소를 위하여 사용하였다. 즉,  $i$ 번째 축의 제어 입력은 다음 식 (8)과 같이 기술된다.

$$u_i = u_i^{feedback} + u_i^{feedforward} \quad (8)$$

$$= \left[ k_p e_i^{coupled} + k_d \dot{e}_i^{coupled} + k_i \int e_i^{coupled} \right] + \left[ k_{pff} \dot{q}_i^{des} + k_{vff} \ddot{q}_i^{des} + k_{aff} q_i^{des} \right]$$

여기서  $k_p$ ,  $k_d$  및  $k_i$ 는 PID 제어기의 피드백 게인이고,  $k_{pff}$ ,  $k_{vff}$  및  $k_{aff}$ 는 앞먹임 제어 입력에서 위치, 속도 및 가속도 기준 궤적에 대한 게인이다. 다축 동기화 제어에 대한 전체적인 제어기 블럭도는 Fig. 10과 같다. 작업공간 상의 기준 궤적이 주어지면 역기구학 해석을 통하여 각 조인트의 기준 궤적을 도출한 후, 각각의 조인트에 대한 제어 입력을 식 (8)에 의하여 계산한다.

대상으로 하고 있는 병렬로봇은 델타 로봇 타입으로 2장에서 구조를 기술하였듯이 3자유도를 가지고 있다. 이 경우 각 축에 대한 동기화 오차는 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (e_1 - e_3) + (e_1 - e_2) \\ (e_2 - e_1) + (e_2 - e_3) \\ (e_3 - e_2) + (e_3 - e_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}$$

또한 결합오차는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} e_1^{coupled} \\ e_2^{coupled} \\ e_3^{coupled} \end{bmatrix} = (I + \gamma \cdot S) \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

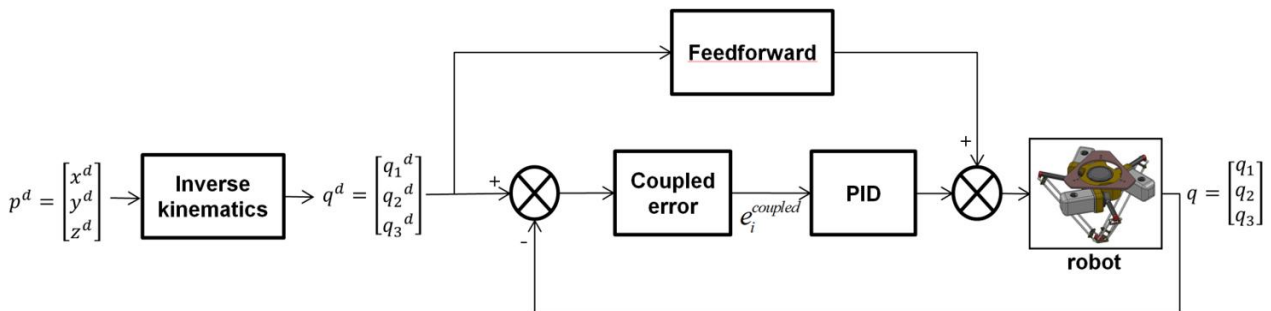


Fig. 10 Overall control scheme

## 4. 검증 결과

### 4.1 시뮬레이션

제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 우선 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 로봇용 시뮬레이터로 심랩사에서 개발한 로보틱스랩(RoboticsLab)을 이용하였다. 개발한 병렬로봇 모델을 시뮬레이터에서 구현하고, 검증용 모션으로 2절에서 기술한 어댑트 사이클 모션을 사용하였다. 제안한 제어 기법의 성능 검증을 위하여 동기화 방법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 추종 성능을 비교하였다. 또한 무부하상태와 3 kg 부하를 장착한 두 가지 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

#### 4.1.1 무부하의 경우

어댑트 사이클 모션은 수직방향과 수평방향 모션으로 이루어져 있는데, 수평방향 모션을 x축 방향으로 맞추고, 수직방향 모션을

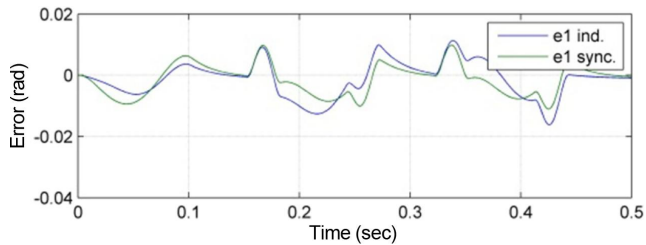
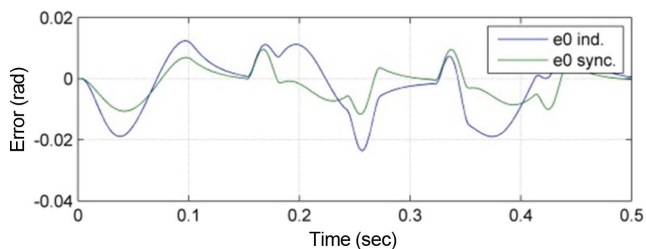


Fig. 11 Error trajectory (no payload)

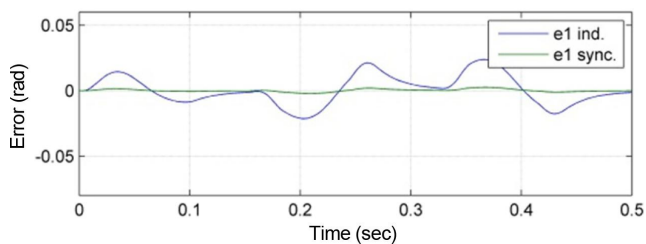
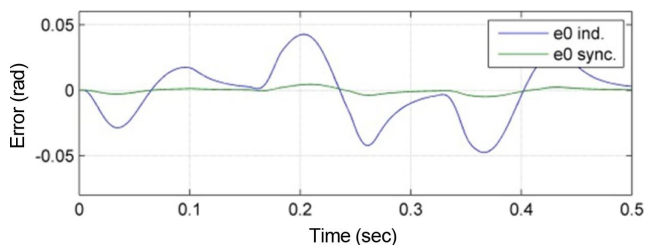


Fig. 12 Synchronization error trajectory (no payload)

z축 방향 모션으로 맞추었다. 또한 구현의 편의를 위하여 하나의 조인트(0번 축)를 정하고 해당 조인트의 회전으로 형성되는 평면은 x축과 z축이 이루는 평면으로 좌표계를 설정하였다. 이렇게 되면 다른 2개의 조인트(1번 축과 2번 축) 모션은 동일하게 되므로, 0번 축과 1번 축의 조인트 모션에 대한 추종 결과만으로 성능을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 0번 축과 1번 축에 대한 추종 오차 궤적을 표시하고 있는데, 축별 독립 제어 방법을 쓴 경우(청색 라인)와 다축 동기 제어 방법을 쓴 경우(녹색 라인)의 성능을 비교하였다. Fig. 12는 동일한 시뮬레이션에 대하여 3절에서 정의한 동기화 오차를 비교하고 있다. 다축 동기화 제어 방법을 쓴 경우 동기화 오차가 감소함을 확인할 수 있었다.

#### 4.1.2 3 kg 부하의 경우

부하를 3 kg으로 증가시키고 동일한 시뮬레이션을 수행하였다. 부하가 증가됨에 따라 오차의 크기도 증가하였지만 제안한 방법을 적용하여 성능이 개선되는 것은 여전히 확인할 수 있었다. 추종 오차와 동기화 오차에 대한 궤적을 Fig. 13과 Fig. 14에 표시하였다. 제안한 방법을 적용하여 추종 성능이 개선됨을 확인할 수 있었다. 또한 Table 1에서 각각의 경우에 대한 최대 및 최소 오차를 비교하였다.

### 4.2 실험

다음으로 제안한 방법의 성능을 실제 실험을 통하여 검증하기 위하여 제작한 병렬로봇 프로토타입에 제안한 다축 동기 제어 알고리즘을 적용하고, 시뮬레이션과 동일하게 어댑트 사이클 모션을 구현하였다. 픽 앤 플레이스 (pick-and-place) 모션은 두 개의 점 ( $x = -152.5$  mm,  $y = 0$ ,  $z = 775$  mm)와 ( $x = +152.5$  mm,

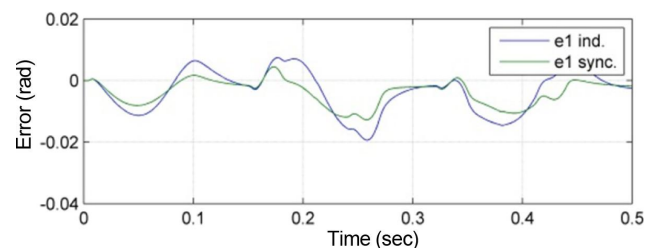
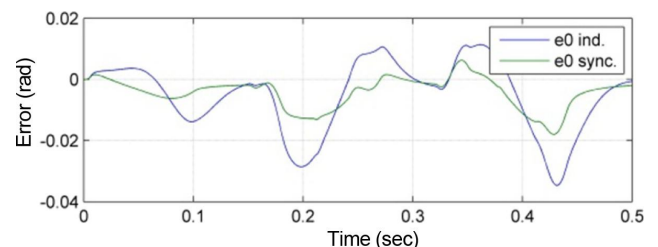


Fig. 13 Error trajectory (3 kg payload)

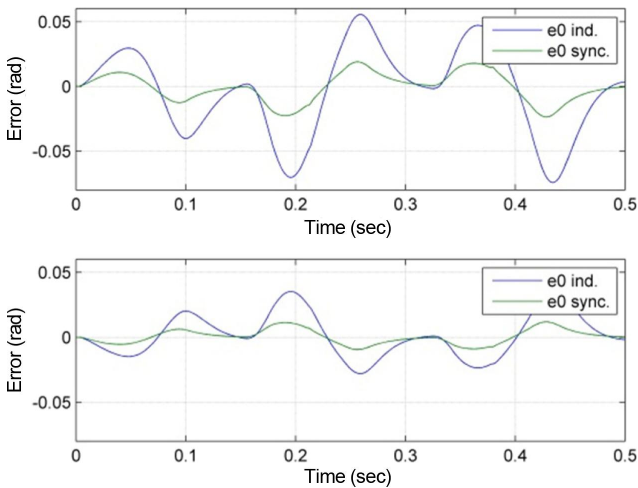


Fig. 14 Synchronization error trajectory (3 kg payload)

Table 1 Comparison of max/min errors (radians)

Payload	Error type	Joint number	Max/Min. errors	Indep. control	Sync. control
0 kg	tracking error	0	max	0.0133	0.0096
			min	-0.0236	-0.0116
		1	max	0.0114	0.0099
			min	-0.0162	-0.0110
	sync. error	0	max	0.0427	0.0044
			min	-0.0476	-0.0050
1		max	0.0238	0.0025	
		min	-0.0214	-0.0022	
3 kg	tracking error	0	max	0.0114	0.0062
			min	-0.0346	-0.0180
		1	max	0.0078	0.0045
			min	-0.0194	-0.0128
	sync. error	0	max	0.0556	0.0189
			min	-0.0744	-0.0236
		1	max	0.0372	0.0118
			min	-0.0280	-0.0095

Table 2 Payload conditions and achieved cycle times

Payload (kg)	0.1	1	2	3
Cycle time (sec)	0.3	0.36	0.4	0.5

y = 0, z = -775 mm)를 왕복하는 동작으로 구현하였다. 또한 사이클 타임은 부하조건에 따라서 다르게 하여 실험을 진행하였는데 목표 사이클 타임은 델타타입의 상용로봇 사양 이상으로 결정하였다. Table 2에 부하조건별 구현한 사이클 타임을 제시하였다.

어댑트 사이클 모션은 2차원 운동이므로 기준 궤적은 x축과 z축

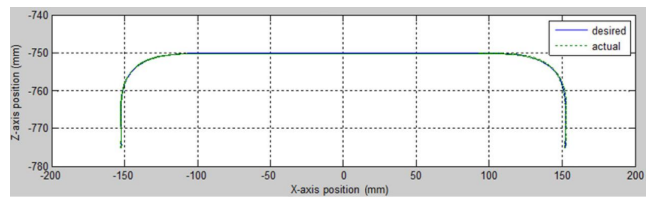


Fig. 15 Desired and actual trajectories in task space for adept cycle motion

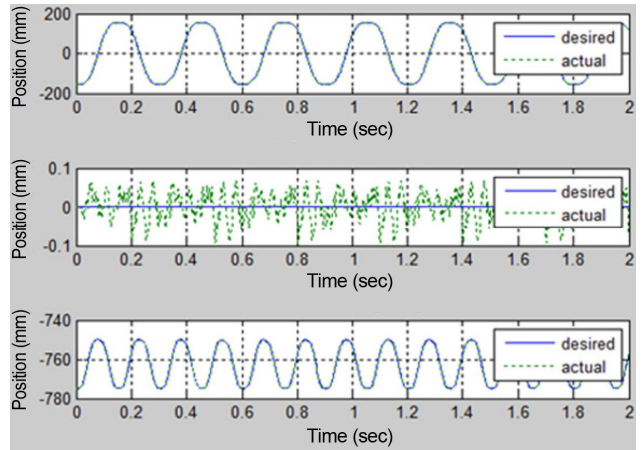


Fig. 16 Position trajectory of moving platform

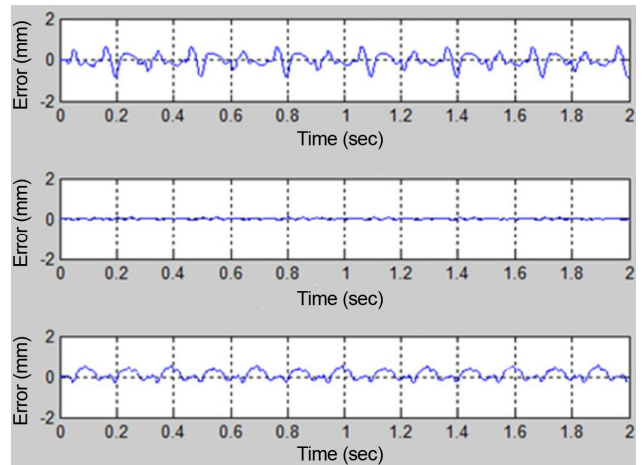


Fig. 17 Error trajectory of moving platform

평면상 운동으로 구현하였다. Fig. 15에 x축과 z축의 평면 상에서의 기준 궤적과 실제 궤적을 표시하였고, x, y 및 z축 각각에 대한 위치 및 오차 궤적을 Fig. 16과 Fig. 17에 각각 제시하였다.

0.1 kg 부하조건에서 가장 빠른 0.3 sec 사이클 타임을 달성하였는데, 이 경우 x축 모션의 최대 위치 오차가 0.85 mm로 전체 이동 거리 305 mm를 고려할 경우 약 0.3%의 오버슈트에 해당되는 수치로 추종 성능이 매우 좋음을 알 수 있다. Fig. 18과 Fig. 19에는 각 조인트별 위치 및 오차 궤적을 제시하였다. 모두 만족할만한 성능을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 로봇의 반복정밀도 또한 레이

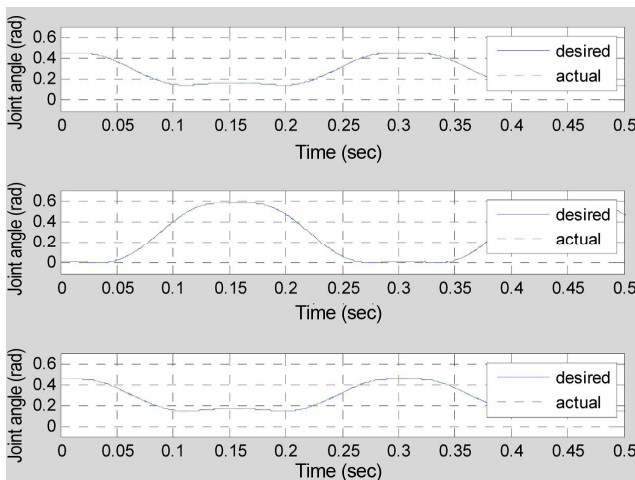


Fig. 18 Position trajectory of each joint

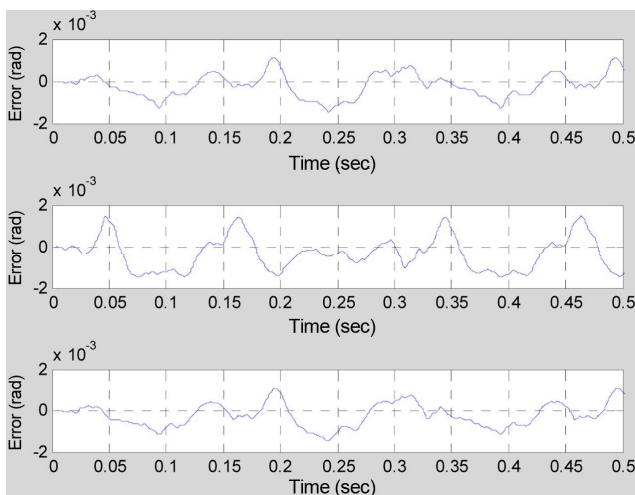


Fig. 19 Error trajectory of each joint

저 트랙터를 이용하여 측정된 결과, 20  $\mu\text{m}$  이내로 매우 우수함을 확인할 수 있었다. 이상의 실험 결과로부터 제안한 방법의 우수함을 검증할 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문은 델타 타입의 3자유도 병렬로봇의 성능 향상을 위하여 기구적 측면에서는 로봇의 작업공간 확대를 위한 볼 조인트 설계 방법과 추종 성능 향상을 위하여 다축 동기화를 통한 제어 방법을 제안하였다. 이를 위하여 동기화 오차를 정의하고 추종 오차와 동기화 오차를 결합한 결합오차를 이용하여 피드백 제어를 수행하였다. 또한 안정화 시간 단축을 위하여 기준 궤적으로부터 앞먹임 제어 입력을 생성하였다. 그리고 제안한 메커니즘을 적용한 프로토타

입 로봇을 제작하고, 다축 동기화 방식의 제어 방법을 적용하여 추종 성능이 향상됨을 검증하였다.

## References

- [1] Boër, C. R., Molinari-Tosatti, L., Smith, K. S., 1999, Parallel Kinematic Machines, SpringerVerlag, Great Britain.
- [2] Merlet, J.-P., 2006, Parallel Robots, Springer, Netherlands.
- [3] Peirrot, F., Nabat, V., Company, O., Krut, S., Poignet, P., 2009, Optimal Design of a 4-DOF Parallel Manipulator: From Academia to Industry, IEEE Trans. Robot., 25:2 213-224.
- [4] Palpacelli, M. C., Carbonari, L., Palmieri, G., Callegari, M., 2015, Analysis and design of a reconfigurable 3-dof parallel manipulator for multimodal tasks, IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 20:4 1975-1985.
- [5] Xie, F., Liu, X.-J., Wang, C., 2015, Design of a novel 3-DoF parallel kinematic mechanism: type synthesis and kinematic optimization, Robotica, 33:3 622-637.
- [6] Chiacchio, P., Pierrot, F., Sciavicco, L., Siciliano, B., 1993, Robust Design of Independent Joint Controllers with Experimentation on a High-Speed Parallel Robot, IEEE Trans. Ind. Electron., 40:4 393-403.
- [7] Li, Q., Wu, F. X., 2004, Control performance improvement of a parallel robot via the design for control approach, Mechatronics, 14:8 947-964.
- [8] Paccot, F., Andreff, N., Martinet, P., 2009, A review on the dynamic control of parallel kinematic machines: theory and experiments, International Journal of Robotics Research, 28:3 395-416.
- [9] Su, Y. X., Sun, D., Ren, L., Wang, X., Mills, J. K., 2005, Nonlinear PD Synchronized Control for Parallel Manipulators, IEEE Int'l Conf. Robot. Automat., 1386-1391.
- [10] Ren, L., Mills, J. K., Sun, D., 2007, Experimental Comparison of Control Approaches on Trajectory Tracking Control of a 3-DOF Parallel Robot, IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 15:5 982-988.
- [11] Shang, W., Cong, S., Zhang, Y., Liang, U., 2009, Active Joint Synchronization Control for a 2-DOF Redundantly Actuated Parallel Manipulator, IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., 17:2 416-423.
- [12] ABB, A. B., 1999, Industrial robot, WO Patent: 2000035640.
- [13] Kim, B. I., Kyung, J. H., Do, H. M., Jo, S. H., 2013, A Study on the Design of High-speed Parallel Robot, J. Korean Soc. Precis. Eng., 30:10 1069-1077.
- [14] Robotics Lab, viewed 1 Sep. 2016, <<http://www.simlab.co.kr/RoboticsLab.htm>>.