

## 6축 병렬형 순응기구를 이용한 위치/힘 동시제어

김한성<sup>a\*</sup>

## Kinestatic Control using Six-axis Parallel-type Compliant Device

Han Sung Kim<sup>a\*</sup><sup>a</sup> School of Mechanical Engineering, Kyungnam University,  
7 Kyungnamdaehak-ro, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 631-701, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	7	August	2014
Revised	1	October	2014
Accepted	10	October	2014

## Keywords:

Kinestatic control  
Compliant device  
Stiffness and compliance matrices  
Twists of compliance  
Twists of freedom  
Parallel robot

## ABSTRACT

In this paper, the kinestatic control algorithm using a six-axis compliant device is presented. Unlike the traditional control methods using a force/torque sensor with very limited compliance, this method employs a compliant device to provide sufficient compliance between an industrial robot and a rigid environment. This kinestatic control method is used to simply control the position of an industrial robot with twists of compensation, which can be decomposed into twists of compliance and twists of freedom. A simple design method of a six-axis parallel-type compliant device with a diagonal stiffness matrix is presented. A compliant device prototype and kinestatic control hardware system and programming were developed. The effectiveness of the kinestatic control algorithm was verified through two kinds of kinestatic control experiments.

## 1. 서론

현재 대부분의 산업용 로봇은 정밀 위치제어 기능만을 제공하나 정밀 조립작업, 연마, 디버링 작업등에서는 위치뿐만 아니라 힘제어도 필요하다는 것은 잘 알려져 있다. 하이브리드 제어(hybrid control)<sup>[1]</sup>는 대표적인 위치/힘 동시제어(간단히, 동시제어) 방법 중의 하나로 위치제어와 힘제어 방향이 직교한다는 가정에 기초한다. 이 방법은 위치와 힘제어 방향의 직교성을 만들기 위해서 작업 로봇과 작업물 사이의 강성행렬 또는 순응행렬이 대각화되어야 한다<sup>[2]</sup>. 유사한 방법으로 RCC(Remote-Center-of-Compliance) 메커니즘<sup>[3]</sup>을 사용하는 동시제어 방법은 작업이 순응중심 근처에서 이루어져야 한다는 한계를 갖는다. Griffis와 Duffy<sup>[4]</sup>는 일반적인 강성행렬에 대하여 위치와 힘제어 방향을 분해할 수 있는 위치/힘

동시제어(kinestatic control) 방법을 제시하였다. 이 방법은 강성행렬의 대각화나 순응중심의 존재를 필요로 하지 않는 일반적인 강성행렬에 대해 적용이 가능한 동시제어 방법이다.

Griffis<sup>[5]</sup>는 작업로봇-F/T(Force/Torque) 센서-단순 순응기구로 구현된 시스템에 대하여 기초적인 동시제어 실험을 수행하였다. 위치센서를 이용하여 힘/토크 측정기능을 갖는 순응기구 설계연구<sup>[6,7]</sup> 및 퍼지논리를 이용하여 동시제어를 안정화하는 방법<sup>[8]</sup>도 제시되었다. 그러나 순응기구를 이용한 동시제어에 대한 연구 및 실험 결과는 매우 제한적이다<sup>[5,9]</sup>.

본 연구에서 제시하는 순응기구를 이용하는 동시제어 방법은 매우 작은 순응성을 갖는 상용 F/T 센서를 이용하는 방법에 비하여 산업용 작업로봇과 작업물 사이에 충분한 순응성 및 안정성을 제공할 수 있다. 제안하는 방법은 기존 위치제어 기반의 산업용 로봇

\* Corresponding author. Tel.: +82-55-249-2627

Fax: +82-505-999-2160

E-mail address: hkim@kyungnam.ac.kr (Han Sung Kim).

끝단에 순응기구를 장착하고 동시제어 알고리즘에서 계산된 보상 값을 산업용 로봇의 위치제어기에 추가 입력함으로써 제어기의 변경 없이 동시제어를 할 수 있는 실용적인 방법이다.

본 논문은 기존 위치/힘 동시제어이론<sup>[4]</sup>에 기초하여 위치 센서가 장착된 순응기구에 대한 동시제어 알고리즘을 제시한다. 기존 동시제어 실험<sup>[5]</sup>은 위치센서가 없는 단순 순응기구를 사용하기 때문에 공구끝단의 위치/힘을 정밀하게 제어하는데 한계가 있다. 그리고 대각화된 강성행렬을 갖는 6자유도 병렬형 순응기구 설계방법과 시작품을 제시한다. 마지막으로 6자유도 병렬형 작업로봇, 6축 순응기구, PC기반 제어기로 구성되는 동시제어 시스템을 개발하고 2가지 작업형태에 대한 동시제어 실험결과를 제시함으로써 제안하는 위치/힘 동시제어 알고리즘의 유효성을 검증한다.

## 2. 위치/힘 동시제어 알고리즘

위치/힘 동시제어는 Fig. 1과 같이 로봇끝단에 부착된 순응기구를 이용하여 로봇의 공구와 작업물 사이의 위치와 힘을 동시 제어하는 방법이다. 이 방법은 로봇끝단과 공구사이에 위치 및 힘/토크 측정기능을 갖는 비교적 순응성이 큰 장치를 사용함으로써 기존 힘/토크 센서에 비하여 힘제어시 안정성을 높일 수 있다는 장점을 갖는다.

위치/힘 동시제어 알고리즘의 개요는 다음과 같다. 본 논문에서는 위치제어 방향을 자유 트위스트(*twists of freedom*),  $\delta D_f$ 로 정의한다. 한편, 힘제어 방향을 구속 렌치(*wrenches of constraint*),  $\delta w_c$ 로 정의한다. 자유 트위스트와 구속 렌치 사이에는 다음과 같은 역관계(*reciprocal relation*)가 성립한다.

$$\delta D_f^T \delta w_c = 0 \tag{1}$$

여기서,  $\delta p$ 와  $\delta \theta$ 를 각각 미소 직선 및 회전 변위벡터라 할 때,  $\delta D = [\delta p^T, \delta \theta^T]^T$ 는 축좌표(*axis coordinates*)로 표현된 트위스트

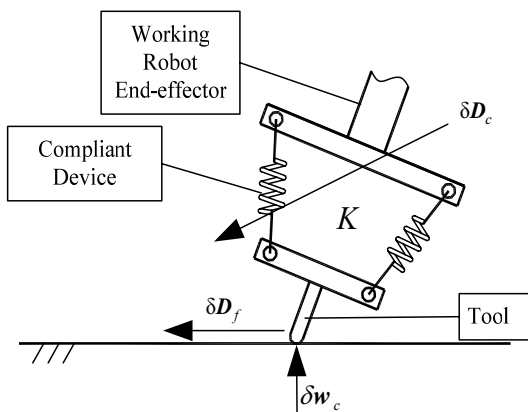


Fig. 1 Illustration of the suggested kinestatic control

를 나타낸다. 한편,  $f$ 와  $n$ 을 각각 힘과 모멘트 벡터라 할 때,  $w = [f^T, n^T]^T$ 는 방사좌표(*ray coordinates*)로 표현된 렌치를 나타낸다<sup>[10]</sup>.

주어진 작업에서 작업물에 작용하는 렌치는 로봇끝단의 모션에 의하여 제어될 수 있고, 이를 순응 트위스트(*twists of compliance*),  $\delta D_c$ 로 정의한다. 이는 다음과 같이 강성행렬로 구할 수 있다.

$$\delta D_c = -K^{-1} \delta w_c \tag{2}$$

식 (1), (2)로부터 역관계를 다음과 같이 구할 수 있고, 위치/힘 동시제어는 작업로봇의 모션을  $\delta D_f$ 와  $\delta D_c$ 로 분해하는 것이라 할 수 있다.

$$\delta D_f^T K \delta D_c = 0 \tag{3}$$

제안하는 위치/힘 동시제어 알고리즘은 6축 순응기구를 위치제어 기반의 6자유도 산업용 로봇 끝단에 부착하여 실험이 가능하다. 본 논문에서는 제어 알고리즘을 검증하기 위하여 Fig. 2와 같이 실험실에서 개발된 6자유도 병렬형 로봇을 작업로봇으로 선정하고 이의 이동플랫폼 하부에 순응기구를 장착하여 동시제어 실험을 수행하고자 한다. 직렬형 산업용 로봇도 기구의 형태만 다르지 동일한 방식으로 동시제어 적용이 가능하다.

Fig. 2는 병렬형 작업로봇, 순응기구, 공구 및 작업물을 도시적으로 나타내고 수식 유도를 위하여 좌표계들을 정의한다. {A}와 {B}는 각각 작업로봇의 고정 및 이동좌표계를 나타내고, {C}의 원점은 점 P에 위치하고 좌표축은 {A}의 좌표축과 평행하게 정의된 작업로봇의 제어를 위한 순간이동좌표계이다. {A}와 {B}는 각각 순응기구의 고정 및 이동좌표계를 나타낸다. {W}는 고정된 부품좌표계 {P}에 대하여 표현된 작업좌표계를 나타내고 {T}는 {B}에 대하여 표현된 공구좌표계로 정의한다. 이 위치/힘 동시제어에서 위치제어의 목표는 공구좌표계 {T}가 작업

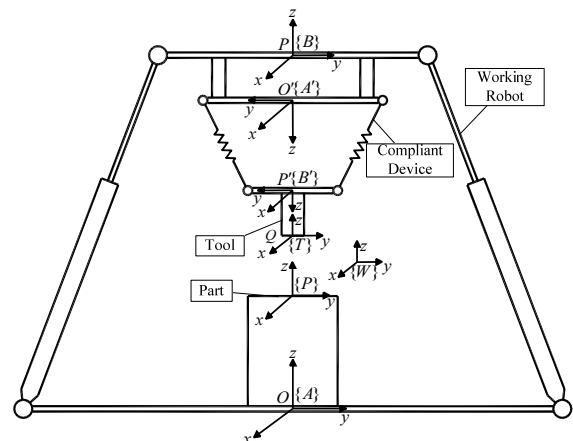


Fig. 2 Frame definitions

좌표계 {W}를 추종하는데 있다. 따라서 위치와 힘의 목표값 및 실제값을 모두 작업좌표계 {W}에서 표현하고 계산된 위치와 힘 오차 벡터를 순간이동좌표계 {C}로 변환하여 계산된 총 보상오차로 작업로봇의 위치제어를 수행한다.

본 논문에서는 각 벡터가 표현되는 좌표계를 선행하는 위첨자로 나타내고, 좌표계 {j}에서 표현된 트위스트와 렌치를 좌표계 {i}로 변환하는 강체변환행렬(rigid body transformation matrix)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$${}^i\delta D = {}^i[E]_j {}^j\delta D, \quad {}^i\delta w = {}^i[e]_j {}^j\delta w \quad (4)$$

여기서,  ${}^i[E]_j = \begin{bmatrix} {}^iR_j & {}^i\mathbf{p}_{ij} \times {}^iR_j \\ 0_{3 \times 3} & {}^iR_j \end{bmatrix}$ ,  ${}^i[e]_j = \begin{bmatrix} {}^iR_j & 0_{3 \times 3} \\ {}^i\mathbf{p}_{ij} \times {}^iR_j & {}^iR_j \end{bmatrix}$  이다. 여기서,  ${}^i\mathbf{p}_{ij} \times$ 는 {i}의 원점에서 {j}의 원점까지의 위치벡터를 표현한 3×3 반대칭행렬(skew symmetric matrix)이고  ${}^iR_j$ 는 {j}에서 {i}로의 회전변환행렬을 나타낸다.<sup>[10,11]</sup>

Fig. 3은 제안하는 위치/힘 동시제어의 블록 다이어그램을 나타낸다. 여기서 I.K.와  $D_R$ 는 각각 역기구학(inverse kinematics) 및 작업로봇의 기준위치를 나타낸다.

먼저, 작업좌표계에서 표현된 자유 트위스트(위치오차 벡터)는 다음과 같다.

$${}^W\delta D_f = {}^W D_d - {}^W D_a \quad (5)$$

여기서  ${}^W D_d$ 과  ${}^W D_a$ 는 공구의 목표입력 및 실제 위치를 나타내고  ${}^W D_a$ 는 작업로봇과 순응기구의 정기구학(forward kinematics)<sup>[12]</sup>으로 계산된다. 자유 트위스트는 강체좌표변환을 통하여 작업로봇의 순간이동좌표계로 변환할 수 있다.

$${}^C\delta D_f = {}^C[E]_W {}^W\delta D_f \quad (6)$$

다음으로 구속 렌치(힘오차 벡터)와 이를 강성사상에 적용하여 구한 순응 트위스트는 다음과 같은 순서로 계산할 수 있다.

순응기구의 측정된 실제 렌치는 정역학 관계식으로 구할 수 있다.

$${}^A w_a = {}^A J \tau \quad (7)$$

여기서  ${}^A J$ 는 순응기구의 고정좌표계에서 표현된 자코비안 행렬이고,  $k_i$ ,  $l_i$ ,  $l_{0i}$ 를 각각 순응기구의 i번째 다리를 구성하는 스프링의 상수, 실제길이 및 초기길이라 할 때, 스프링 힘은  $\tau_i = k_i(l_i - l_{0i})$ 이고 조인트 힘벡터는  $\tau = [\tau_1, \dots, \tau_6]^T$ 이다. 작업 좌표계로 변환된 실제 렌치는 다음과 같이 계산된다.

$${}^W w_a = {}^W[e]_A {}^A w_a \quad (8)$$

구속렌치는 다음과 같이 구한다.

$${}^W\delta w_c = {}^W w_d - {}^W w_a \quad (9)$$

여기서  ${}^W w_a$ 는 목표입력 렌치를 나타낸다. 순응기구의 자코비안과 강성행렬이 순응기구의 고정좌표계에서 계산되었으므로 구속렌치를 {A'}로 다시 변환하면,

$${}^{A'}\delta w_c = {}^{A'}[e]_{W'} {}^W\delta w_c \quad (10)$$

강성사상을 이용하여 이 구속렌치에 해당하는 순응 트위스트는 다음과 같다.

$${}^{A'}\delta D_c = -{}^{A'}K^{-1} {}^{A'}\delta w_c \quad (11)$$

작업로봇의 순간이동좌표계로 변환하면 다음과 같다.

$${}^C\delta D_c = {}^C[E]_{A'} {}^{A'}\delta D_c \quad (12)$$

마지막으로 전체보상 트위스트(total twists of compensation)는 다음과 같이 구할 수 있다.

$${}^C\delta D_t = G_f {}^C\delta D_f + G_c {}^C\delta D_c \quad (13)$$

여기서  $G_f$ 와  $G_c$ 는 무차원 상수로 각각 위치 및 힘 제어 게인으로 정의한다. Fig. 3과 같이  ${}^C\delta D_t$ 를 작업로봇의 위치제어기에 입력하여 위치/힘 동시제어를 수행할 수 있다.

### 3. 순응기구 설계

제안하는 제어방법은 순응기구가 순응중심 또는 대각화된 강성행렬을 필요로 하지 않는 일반적인 위치/힘 동시제어 방법이다. 그러나 직선 및 회전 축간의 연성효과를 감소하기 위하여 대각화된 강성행렬을 갖도록 순응기구를 설계하는 것이 바람직하다. 6자유도 기구 중 안정성이 우수한 가우-스튜어트 플랫폼(Gough-Stewart platform)<sup>[12]</sup> 병렬형 기구를 순응기구의 메커니즘으로 선정하고 이의 강성행렬을 대각화할 수 있는 방법 중 Fig. 4와 같이 인접하는 2개의 다리가 수직평면상에 있을 때, 강성행렬이 Q점에서 대각화되는 방법을 선택하였다. Q점에서 강성행렬은 다음과 같다.

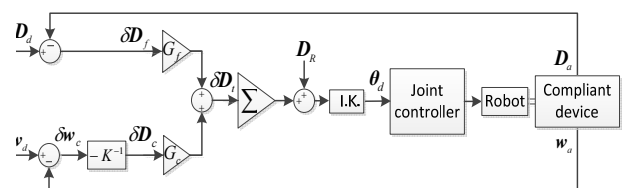


Fig. 3 Block diagram of the kinestatic control

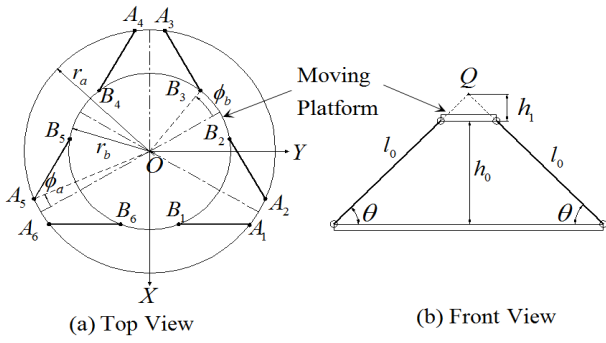


Fig. 4 Design parameters of the parallel-type compliant device

$$K = k \text{diag}(3c\theta^2, 3c\theta^2, 6(1 - c\theta^2), 3r_b^2(1 - c\theta^2), 3r_b^2(1 - c\theta^2), 6r_b^2c\theta^2) \quad (14)$$

여기서  $k = k_1 = \dots = k_6$  는 다리의 스프링 상수이다.

대각화된 강성행렬을 갖는 순응기구를 설계하기 위하여 예를 들어 다리1의 단위벡터는 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$s_{1x} = \frac{r_b c \phi_b - r_a c(\pi/3 - \phi_a)}{l_0} = 0, \quad s_{1y} = \frac{r_b s \phi_b - r_a s(\pi/3 - \phi_a)}{l_0} = -c\theta, \quad s_{1z} = \frac{h_0}{l_0} = s\theta \quad (15)$$

식 (15)의 6개의 설계변수 중,  $r_a, r_b, h_0$ 가 선정되었을 때, 나머지 설계변수  $\phi_a, \phi_b, l_0$ 는 다음과 같다.

$$\phi_a = \cos^{-1}\left(\frac{\sqrt{g} + \sqrt{3}(r_a^2 - r_b^2 + l_0^2 c\theta^2)}{4r_a l_0 c\theta}\right), \quad \phi_b = \sec^{-1}(2r_b l_0 c\theta / \sqrt{g}), \quad l_0 = h_0 / s\theta \quad (16)$$

여기서,  $g = (r_a + r_b + l_0 c\theta)(-r_a + r_b + l_0 c\theta)(r_a - r_b + l_0 c\theta)(r_a + r_b - l_0 c\theta)$ .

본 연구에서는  $\theta = 45^\circ$  로 선정하였고, Table 1은 선정된 설계 변수 및 식 (16)으로 계산된 나머지 설계 변수를 나타낸다. 이 경우 Q점( $h_1 = 16.9$  mm)에서 순응기구의 강성 행렬은 다음과 같다.

$$K = k \text{diag}\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}, 3, \frac{3}{2}r_b^2, \frac{3}{2}r_b^2, 3r_b^2\right) \quad (17)$$

Fig. 5와 같이 순응기구를 구성하는 각 다리의 실린더 내부에 직선스프링( $k = 6.5$  N/mm)을 장착하고 외부에  $5 \mu\text{m}$  분해능을 갖는 광학엔코더를 장착하였다. 순응기구의 각 다리의 변형을 엔코더로 측정함으로써 6개 다리에 작용하는 힘을 계산할 수 있고 식 (7)로부터 순응기구의 힘/토크를 계산할 수 있다. 각 다리의 이상적인 힘 분해능은 32.5 mN이고 순응기구 이동플랫폼 상에서 평면 및 수직 방향의 힘 분해능은 약 39 mN 및 138 mN이다. 이 순응

Table 1 Design parameters of the 6-axis compliant device

Kinematic Parameters	Value
Radius of the fixed platform ( $r_a$ )	140.962 mm
Radius of the moving platform ( $r_b$ )	86.309 mm
Initial height of the moving platform ( $h_0$ )	95.813 mm
Half angle at the fixed platform ( $\phi_a$ )	$6.9^\circ$
Half angle at the moving platform ( $\phi_b$ )	$11.3^\circ$
Initial leg length ( $l_0$ )	135.5 mm
Maximum spring deflection ( $\pm \Delta l$ )	$\pm 10.0$ mm

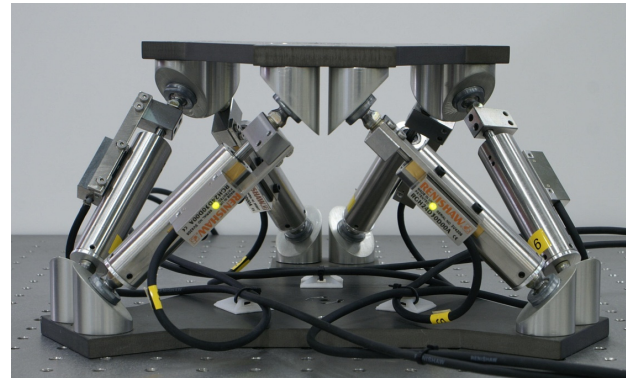


Fig. 5 6-axis compliant device prototype

기구는 비교적 큰 변형이 발생하고 초기위치에서 벗어날수록 강성 행렬은 점차 비대칭행렬이 되고 참고문헌<sup>[13]</sup>의 결과를 이용하여 식 (11)의 강성행렬을 계산할 수 있다.

## 4. 위치/힘 동시제어 실험

### 4.1 실험 장치

Fig. 6과 같이, 동시제어 시스템은 6자유도 가우-스튜어트 플랫폼 폼형 작업로봇, 6축 순응기구 및 작업로봇 제어기로 구성된다. Fig. 7과 같이 작업로봇의 제어기는 Host PC(개발환경 제공 및 상위제어), Target PC(실시간 제어), DAQ 보드, AC 서보드라이브, AC 서보모터로 구성된다. 순응기구의 광학 엔코더도 DAQ를 통하여 Target PC로 인터페이스 되었다. Table 2는 작업로봇의 기구학적 치수를 나타낸다. Host PC에는 MathWorks사의 Simulink로 제어프로그램을 작성하고 컴파일한 후, 이를 xPC Target인 실시간 운영체제로 작동하는 Target PC에 다운로드하여 실행한다. 위치 제어 루프는 1 msec로 기구학 연산 및 동시제어루프는 10 msec로 설정하였다.

제어 알고리즘의 유효성과 제어 계인의 역할을 살펴보기 위하여 Fig. 8과 같이 순응기구를 작업로봇 이동플랫폼 하부에 장착하여

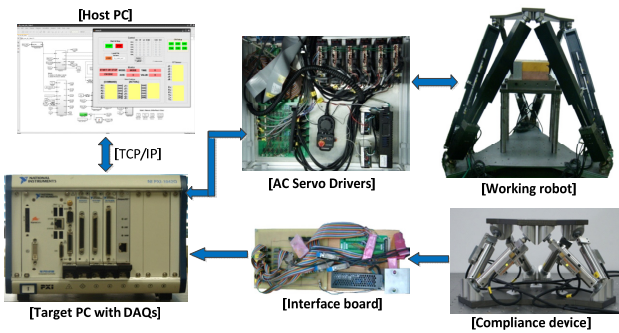


Fig. 6 Configuration of the kinstatic control system

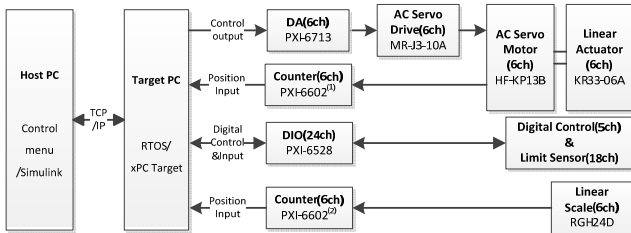
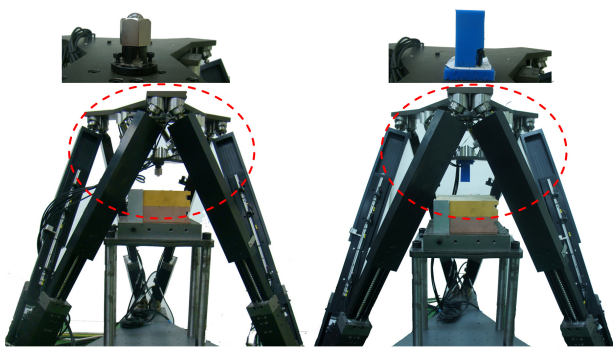


Fig. 7 Block diagram of the kinstatic control system

Table 2 Kinematic parameters of the parallel-type working robot

Kinematic Parameters	Value
Radius of the fixed platform ( $r_a$ )	496.040 mm
Radius of the moving platform ( $r_b$ )	255.376 mm
Initial height of the moving platform ( $h_0$ )	4.046°
Half angle at the fixed platform ( $\phi_a$ )	8.223°
Half angle at the moving platform ( $\phi_b$ )	668 mm
Initial leg length ( $l_0$ )	979 mm
Maximum spring deflection ( $\pm \Delta l$ )	311 mm



(a) 1DOC-5DOF (Ball-type tool) (b) 3DOC-3DOF (Flat surface tool)

Fig. 8 Experimental setups

2가지 작업형태(1DOC-5DOF, 3DOC-3DOF)에 대한 위치/힘 동시제어 실험을 수행하였다. 여기서 DOC(Degree-Of-Constraint), DOF(Degree-Of-Freedom)을 의미한다.

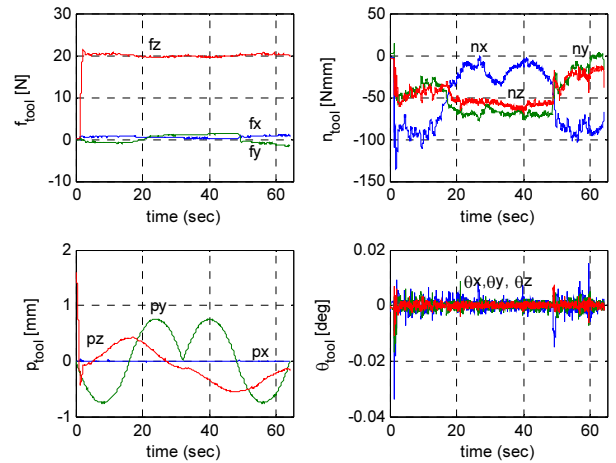


Fig. 9 Case I (1DOC-5DOF):  $G_c = 0.025, G_f = 0.1$

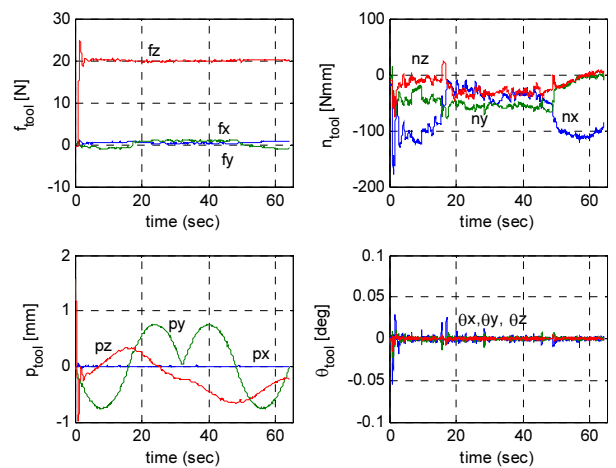


Fig. 10 Case II (1DOC-5DOF):  $G_c = 0.05, G_f = 0.1$

#### 4.2 1DOC-5DOF 실험결과

첫 번째 실험은 힘  $f_z$ 를 제어하면서 다른 5위치와 자세  $p_x, p_y, \theta_x, \theta_y, \theta_z$ 를 동시제어하는 실험이다. 4방향의 위치와 자세는 고정하고  $p_y$ 를 3차 다항식 궤적을 이용하여 원점에서 이동하였다.

$$\text{목표 힘/모멘트: } {}^W \mathbf{w}_d = [*, *, 20; *, *, *]^T \text{ [N; Nmm]}$$

$$\text{목표 위치/자세: } {}^P \mathbf{D}_d = [0, \pm 80, *; 0, 0, 0]^T \text{ [mm; deg]}$$

여기서 \* 기호는 해당되는 위치 또는 힘 방향으로 제어를 하지 않음을 의미한다. Fig. 9 ~ 12에서  $\mathbf{f}_{tool}$ 과  $\mathbf{n}_{tool}$ 은 작업좌표계  $\{W\}$ 에서 공구의 힘과 모멘트 벡터를 나타내고,  $\mathbf{p}_{tool}$ 과  $\boldsymbol{\theta}_{tool}$ 은 작업좌표계  $\{W\}$ 에서 공구의 위치와 자세 벡터를 나타낸다. 이상적인 경우에는 공구좌표계가 작업좌표계를 추종해야 하므로  $\mathbf{p}_{tool}$ 과  $\boldsymbol{\theta}_{tool}$ 은 위치 및 자세 오차에 해당된다.

Fig. 9와 Fig. 10으로부터 힘제어 게인  $G_c$ 의 영향을 알 수 있다.  $G_c$  게인이 클수록 힘제어 오차 및 반응시간은 감소하나 오버슈트

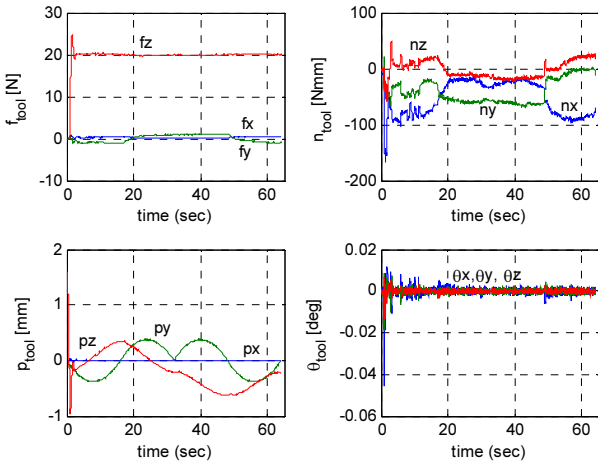


Fig. 11 Case III (1DOC-5DOF):  $G_c = 0.05, G_f = 0.2$

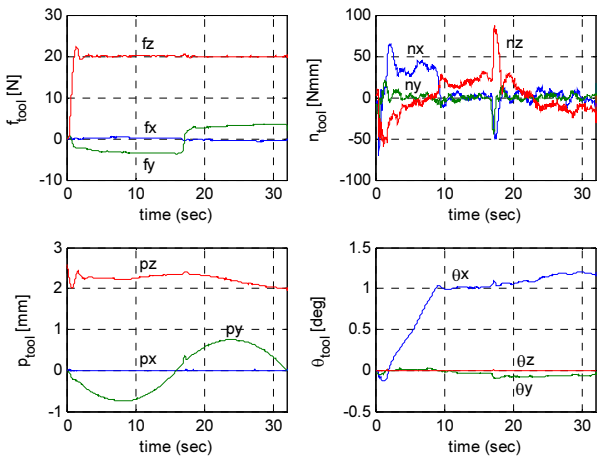


Fig. 12 3DOC-3DOF experiment with  $G_c = 0.05, G_f = 0.1$

(overshoot)는 증가함을 알 수 있다. 반면, Fig. 10과 Fig. 11로부터 위치제어 게인  $G_f$ 의 영향을 알 수 있다.  $G_f$  게인이 클수록 위치 추종오차가 감소함을 알 수 있다. Fig. 11에서 정상상태의 힘제어 오차가 3% 내에 있음을 알 수 있고 위치 및 자세 오차도 매우 작은 수준 안에 있음을 알 수 있다.  $f_y$ 가  $f_x$ 에 비하여 상대적으로 크게 변화하는 것은  $y$ 방향으로 이동하면서 공구와 작업물 사이의 마찰력 때문이다.

4.3 3DOC-3DOF 실험결과

두 번째 실험은 힘  $n_y$ 를 제어하면서 위치  $p_x, p_y$ 와 자세  $\theta_z$ 를 동시제어하는 실험이다.  $p_x$ 와  $\theta_z$ 는 고정하고  $p_y$ 를 3차 다항식 궤적을 이용하여 원점에서 80 mm 이동한 후 원점으로 복귀하였다.

목표 힘/모멘트:  ${}^W\mathbf{w}_d = [*, *, 20; 0, 0, *]^T$  [N; Nmm]

목표 위치/자세:  ${}^P\mathbf{D}_d = [0, 80, *, *, *, 0]^T$  [mm; deg]

Fig. 12에서 초기의 오버슈트를 제외하면  $f_z, n_x, n_y$ 는 작은

오차를 유지하면서 추종함을 알 수 있고,  $y$ 방향으로 이동하므로 마찰력으로 인하여  $n_x$ 의 변화가  $n_y$  보다 큼을 알 수 있다. 공구 끝단이 평면이므로 이전 실험에 비하여 마찰력이 크므로  $f_y$ 도 증가함을 알 수 있다.  $\theta_x$ 와  $\theta_y$ 값은 설치시 공구 평면과 작업물 평면의 각도오차로 기인함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 위치/힘 동시제어 이론에 기초하여 위치센서가 장착된 6축 순응기구를 사용하는 동시제어 알고리즘을 제시하고 이의 동시제어실험을 실현하였다. 대각화된 강성행렬을 갖는 6축 병렬형 순응기구 설계방법을 제시하고 선형 엔코더를 이용하여 힘/토크를 정밀 측정할 수 있는 6축 병렬형 순응기구 시작품을 개발하였다. 6자유도 병렬형 작업로봇, 6축 병렬형 순응기구, PC기반 개방형 제어기 및 Simulink로 작성된 동시제어 프로그램으로 위치/힘 동시제어 시스템을 구축하였다. 2가지 작업형태의 위치/힘 동시제어 실험을 통하여 위치 및 힘 제어 게인의 영향을 고찰하고 개발된 동시제어 알고리즘을 통하여 힘뿐만 아니라 위치도 목표치를 잘 추종함을 확인하였다. 향후 연구는 동시제어 속도를 높이는 연구와 다양한 작업형태에 대한 동시제어 실험을 수행하고자 한다.

References

- [1] Raibert, M. J., Craig, J. J., 1981, Hybrid Position/force Control of Manipulators, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control 103 126-133.
- [2] Duffy, J., 1990, The fallacy of modern hybrid control theory that is based on orthogonal complements of twist and wrench spaces, Journal of Robotic Systems 7:2 139-144.
- [3] Drake, S. H., Simunovic, S. N., 1979, Compliant Assembly System Device, U.S. Patent 4,155,169.
- [4] Griffis, M., Duffy, J., 1991, Kinestatic Control: A Novel Theory for Simultaneously Regulating Force and Displacement, Trans. ASME Journal of Mechanical Design 113:4 508-515.
- [5] Griffis, M., 1991, A novel theory for simultaneously regulating force and displacement, Doctorate Thesis, University of Florida
- [6] Jung, H., 2006, Mechanisms with Variable Compliance, Doctorate Thesis, University of Florida
- [7] Choi, S. W., Choi, Y. J., Kim, S. H., 1991, Using a Compliant Wrist for a Teleoperated Robot, Proc. of the 1999 IEEE/RSJ IROS 585-589.
- [8] Seo, J. W., Choi, Y. J., 1993, Kinestatic Control using a Compliant Device by Fuzzy Logic, Proc. of KSME Conference 917~922.

- [9] Vibhute, A., 2011, Implementing Kinestatic Control using Six DOF Compliant Parallel Mechanism, Master thesis, University of Florida.
- [10] Duffy, J., 1996, Statics and Kinematics with Applications to Robotics Cambridge University press, Cambridge, UK, 91-94.
- [11] Kim, H. S., 2014, Stiffness Analysis of Planar Parallel Manipulators with Serially Connected Legs, Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 23:2 164-1723.
- [12] Tsai, L. W., 1999, Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, John Wiley & Sons, Inc., 151-161, and 289-293.
- [13] Griffis, M., Duffy, J., 1993, Global Stiffness Modeling of a Class of Simple Compliant Couplings, Mechanisms and Machine Theory 28 207-224.