

힘반향 Hand Controller 설계

Designing a Force-Reflecting Hand Controller

김기호, 김승호(한국원자력연구소)
Kiho Kim, Seungho Kim(Korea Atomic Energy Research Institute)

ABSTRACT

A hand controller in teleoperation is a man-machine interface device that provides real-time interaction between a human operator at control site and a slave manipulator at remote site. In this paper, we examine the design issues related to various types of hand controllers in use. Emphasis is placed on bilateral hand controllers and their design parameters. We describe the design of a new 6 degree-of-freedom universal force-reflecting hand controller to control a remote Schilling Titan manipulator. This hand controller allows the operator to maintain spatial correspondence in remote manipulative operations and feel a sense of contact with the environment. Finally, we demonstrate the graphic simulation of the hand controller to verify its design characteristics.

Key Words : teleoperation(원격조작), hand controller(핸드컨트롤러), force-reflecting(힘반향), master-slave manipulator(마스터/슬레이브 매니플레이터), universal type(범용형), human operator(조작자)

1. 서론

위험한 환경 하에서 수행되는 작업의 원격화에 대한 필요성은 꾸준히 인식되어 왔으며 작업 종사자들 로보트로 대체하기 위한 연구도 함께 계속되어왔다. 우주 및 원자로 내부 원격탐사와 같은 극한환경에서 요구되는 비정형 작업들은 원격로봇(telerobot)에 의해서만 수행될 수 있다.

원자력 산업에서 요구되는 원격작업은 마스터/슬레이브 매니플레이터(master-slave manipulator)⁽¹⁾에 의하여 이루어지며 슬레이브 매니플레이터(이하 슬레이브라 함)는 조작자(human operator)에 의하여 수동으로 운전된다. 대부분의 고방사선구역 작업들은 복잡하고 예측 불가능하여 미리 작업계획을 수립하기가 어렵기 때문에 이러한 작업들을 안전하고 성공적으로 수행하기 위해서는 조작자의 판단능력, 조작기술, 센서정보 선별 등과 같은 상호작업의 통합이 필요하다. 슬레이브를 이용하여 원격작업을 수행할 때 조작자는 시각, 청각, 촉각 등의 센서정보를 필요로 한다. 조작자는 마스터 매니플레이터(이하

마스터라 함) 또는 핸드컨트롤러(hand controller)라 불리는 입력장치를 조작함으로써 원격 작업환경 내에 있는 슬레이브를 조종한다. 조작자와 입력장치, 슬레이브는 원격조작시스템(teleoperated system)을 구성하는 주요 요소들이다. 입력장치는 조작자의 명령을 슬레이브에 전달하고 또한 슬레이브에서 발생하는 외부 지각정보를 손을 통하여 조작자에게 제공하는 유일한 통신 링크로서 원격조작시스템의 인간과 기계를 인터페이스 시켜주는 중요한 부분이다. 그러나 현재 산업현장에서 사용되고 있는 많은 입력장치들에 비해 이들의 설계 및 사양, 성능에 관한 정량적인 데이터는 잘 확립되어 있지 않다.

본 논문은 현재 개발되어 사용중인 여러 가지 입력장치들의 기구학적 구조와 형태, 설계변수, 양방향 제어(bilateral control) 등을 비교, 검토하고, 슬레이브인 Schilling Titan 매니플레이터⁽²⁾를 조종하기 위한 6자유도의 힘반향(force-reflecting) 핸드컨트롤러 설계에 관한 연구를 기술한다. 또한 그래픽 시뮬레이션을 통하여 설계된 핸드컨트롤러의 기구학적 특성과 기계적 조작성을 입증한다.

2. 입력장치 비교 및 검토

2.1 기하학적 형태

1940년대 후반부터 개발되기 시작한 입력장치(이하 매스터라 함)는 장치의 복잡성과 기능에 따라 단순한 스위치 박스에서부터 조이스틱, 6자유도 힘반향 매스터까지 다양하다. 매스터는 슬레이브와 연결되는 기구학적 형태에 따라 크게 유사형(replica type)과 범용형(universal or generalized type)으로 구분된다. 유사형 매스터⁽³⁾는 슬레이브와 비슷한 기구학적 구조를 갖으며, 동일하거나 축소된 기계적 형태를 갖는다. 즉, 매스터와 슬레이브 각각의 조인트에 대하여 일대 일 대응(one-to-one correspondence) 기하학 구조와 제어방식을 취한다. 유사형의 각 조인트서보는 슬레이브의 조인트서보와 기구학적으로 서로 대응하여 좌표계의 변환이 필요 없으므로 빠르고 안정된 응답을 얻을 수 있으나, 본질적인 메커니즘 구조와 조인트 제어방식에 기인하는 몇 가지 문제점을 갖는다. 특정 슬레이브에 대하여 특정 매스터가 요구되므로 구조가 서로 상이한 매스터와 슬레이브 쌍이나 여유자유도를 갖는 슬레이브를 제어하는데 어려움이 있다. 여유자유도를 갖는 슬레이브를 제어하기 위해서는 여유자유도를 갖는 매스터가 필요하며, 조작자가 이를 조작하기 위해서는 많은 어려움이 있다. 또한 메커니즘의 구조적 비선형성 때문에 매스터와 슬레이브 간의 운동과 힘을 축적하는데 있어서 절대적 일치성을 상실하므로, 미세한 위치제어를 하기 위해서는 보다 큰 형태의 매스터를 필요로 한다. 결과적으로 조작자에게 운전 부담을 가중시키며, 위치와 힘 해상도를 손상시킨다.

이같은 유사형 매스터의 문제점을 극복하기 위하여 1980년대부터 매스터와 슬레이브의 형태와 구조가 서로 상이한 범용형 메커니즘⁽⁴⁾의 연구가 진행되어 왔으며, 이러한 매스터는 주로 핸드콘트롤러라 일컬어진다. 범용형 핸드콘트롤러와 슬레이브는 기구학 및 동역학적 성질들이 서로 완전히 상이하며, 직각좌표계에서 핸드콘트롤러의 핸드그립(hand grip)과 슬레이브 말단장치 끝점의 위치와 자세를 제어하는 방식을 취한다. 이러한 제어방식은 좌표계 변환이 요구됨으로 계산량 증대로 인하여 제어루프에서 시간지연(time delay)을 유발시켜 제어계를 불안정하게 만들 수 있으며, 기구학적 상이성 때문에 특이성(singularity)문제를 야기시킬 수 있다. 그러나 범용형은 위에서 언급한 유사형이 갖고있는 문제점을 해결하여 원격조작시스템의 성능을 향상시킬 수 있으며, 슬레이브 종류와 형태에 구속받지 않으므로

장치 조작성의 극대화를 피하면서 설계에 있어서 보다 유연성을 갖는다.

2.2 범용형 핸드콘트롤러

핸드콘트롤러는 조작자로부터 입력되는 임의의 위치와 자세 명령을 감지하여 슬레이브에 전달하기 위해서 최소한 6자유도가 필요하며, 슬레이브 말단장치에서 발생하는 반력, 촉각정보를 조작자에게 피드백 시키기 위해서 힘반향 기능이 요구된다. 힘반향은 원격작업의 달성시간을 단축시키고, 조작자의 실수를 줄이며, 슬레이브의 물체 또는 작업환경과의 접촉력을 감소시킨다⁽⁵⁾. 본 절에서는 이미 개발된 6자유도의 범용형 힘반향 핸드콘트롤러에 대하여 알아본다.

Fig. 1(a)는 직렬링크로 연결된 JPL(Jet Propulsion Laboratory)핸드콘트롤러⁽⁶⁾를 보여준다. 각 링크들은 기계적, 전기적으로 평형을 이루고, 각 링크 조인트들은 케이블과 풀리로 연결되어있다. 힘반향은 핸드콘트롤러와 슬레이브 사이의 위치 오차에 의하여 핸드콘트롤러의 각 조인트에 부착된 직류토크모터를 구동함으로써 이루어진다. 직교형링크 메커니즘을 이용한 핸드콘트롤러(Fig. 1(b),(c))는 X-Y-Z 직교링크(선형운동)위에 3축의 짐발(gimbal)구조(회전운동)가 연결되어있으며, 조작자로부터 입력되는 위치와 자세 명령이 분리된다. Toshiba핸드콘트롤러⁽⁷⁾(Fig. 1(b))와 Cybernet 핸드콘트롤러⁽⁸⁾(Fig. 1(c))는 각각 힘 오차와 위치 오차를 이용하여 조작자에게 힘을 피드백시킨다. Fig. 1(a),(b),(c)와 달리 병렬링크구조로된 Stewart 플랫폼형의 AEA핸드콘트롤러⁽⁹⁾(Fig. 1(d))는 각각 역구동이 가능한 4개의 링크로 이루어진 3쌍의 액츄에이터(actuator)들을 병렬로 연결하였으며, 핸드그립을 움직임으로 위치와 자세명령을 생성한다. 병렬메커니즘은 직렬메

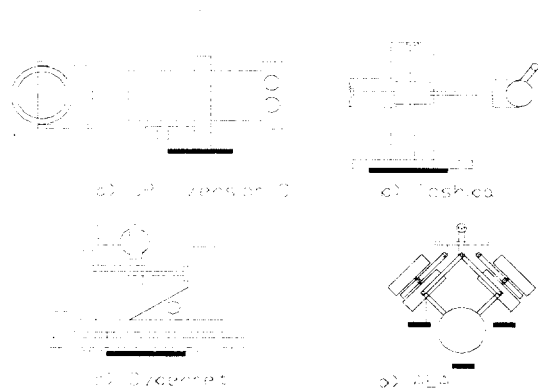


Fig. 1 Schematic diagram of hand controllers

Table 1 Hand controller characteristics

| 변수 \ 종류 | JPL-C | Cybernet | Toshiba |
|----------|---|---|--|
| 운동범위 | J1, J2, -33.5°, J3-31.8cm, J4-326°, J5-295°, J6-340° | X, Y, Z=10.16cm, 요, 피치=90°, 롤=180° | X, Y, Z=15cm, 롤=180°, 피치=120°, 요=180° |
| 작업영역 | 0.053 m ³ | 0.001 m ³ | 0.003 m ³ |
| 위치정도 | J1, J2, -0.016°, J3-0.76cm, J4, J5, J6-0.028° | X, Y, Z=7x10 ⁻³ cm 요, 피치, 롤=1/90° | ? |
| 최대힘/토크출력 | 35.6 N/1.6 Nm | 89 - 111 N | 25 N/0.45 Nm |
| 힘반향방식/센서 | 위치오차/엔코더 | 위치오차/엔코더 | 힘오차/힘/토크 |

커니즘에 비하여 강도(rigidity)에 있어서는 더 단단하나 작은 작업영역을 갖으며, 직렬메커니즘과 반대로 정기구학 해를 구하는 데에 어려움이 있다.

이같은 범용형 핸드콘트롤러의 손목조인트들은 핸드그립의 중심에서 서로 직교하여, 운전시 핸드그립을 쥐고있는 조작자의 손과 슬레이브 말단장치사이에 공간상의 일치감을 제공하므로 조작성을 향상시킨다. Table 1은 조인트 운동범위, 작업영역, 위치정도, 최대출력힘/토크, 힘반향방식 등의 직렬링크로 연결된 핸드콘트롤러의 설계변수들을 보여준다. 그러나 원격작업의 성능을 증대시키기 위한 이들의 최적설계 값 또는 범위에 대한 기준은 아직 마련되어 있지 않다.

3. 힘반향 핸드콘트롤러 설계

본 장에서는 원자력발전소 증기발생기 유지, 보수 작업에 사용될 Schilling Titan 매니플레이터(6자유도 유압구동식)를 조종하기 위한 6자유도 범용 힘반향 핸드콘트롤러 설계에 관하여 기술한다.

3.1 설계개념 및 고려사항

원격조작(teleoperation)의 궁극적인 목적은 '조작자가 마치 원격작업 환경에서 본인이 직접 작업을 수행하는 것 같은 느낌(transparenty)'을 갖게 하기 위해서 핸드콘트롤러를 사용하여 슬레이브를 조종하면서 조작자에게 제공되는 시각, 촉각, 청각을 통하여 원격현실감(sense of telepresence)을 성취하는 것이다. 핸드콘트롤러의 기계구조, 구동 액츄에이터, 센서, 제어루프구현 등의 한계 때문에 완전한 transparency를 실현하기는 매우 어렵다. 본 연구에서는 핸드콘트롤러의 transparency를 증대시키기 위하여 아래와 같은 사항을 설계에 반영하였다.

역구동성(backdriveability) : 핸드콘트롤러가 조작자와 슬레이브 사이의 중간 매개체로서 양방향으로 명

령, 센서정보를 전달하기 위해서 메커니즘은 역구동이 가능하여야 한다.

백래쉬 : 조작자 손의 움직임(지령명령)을 정확하게 센싱하기 위하여 조인트 동력전달장치들의 백래쉬를 최소화한다.

작업영역 : 핸드콘트롤러의 작업영역은 조작자의 효율성과 해상도, 위험도, 피로도에 영향을 미치므로, 슬레이브 작업환경(증기발생기 수실내부)을 고려하여 위 변수들의 질층을 통하여 작업영역의 크기를 결정한다.

평형성(counterbalancing) : 메커니즘의 불균형은 조작자에게 조작부담을 가중시키고, 중력보상 때문에 제어루프의 계산량을 증대시키므로 각 링크들의 균형을 유지한다.

크로스커플링(cross coupling) : 핸드콘트롤러와 슬레이브 사이의 좌표계 변환에 따른 계산부담을 줄이고, 기구학을 간소화하기 위하여 각 링크 조인트들의 커플링을 제거한다.

이같은 요구조건들은 서로 상호관련이 있으므로 핸드콘트롤러의 성능과 비용을 고려하면서 설계에 적용하였다.

3.2 형태 및 특성

3.1 절에서 명시한 요구조건에 근거하여 설계된 핸드콘트롤러의 형태와 기구학적 개략도가 Fig. 2에서 보여진다. 설계된 핸드콘트롤러는 6자유도의 직렬링크로 연결되어 있으며 각 링크들은 서로 직교한다. 핸드그립의 위치와 자세는 각각 처음 3개의 선형조인트(직각좌표 구조)와 나머지 3개의 롤-피치-요 손목조인트(집발 구조)에 의하여 제공되며, 손목조인트 축들은 핸드그립의 중심에서 서로 교차한다. 이같은 기구학적 구조는 핸드그립의 위치와 자세를 기계적으로 서로 분리하여 간단한 기구학적 구조와 동역학 모델을 제공하므로, 핸드콘트롤러와 슬레이브 좌표계 사이의 좌표변환을 빠르게 하고 제어알고리즘의 구조를 단순하게 한다.

요구되는 증기발생기 유지, 보수 작업은 슬레이브(Titan 매니플레이터) 말단장치의 정확한 위치제어가 요구되므로, 핸드콘트롤러의 작업영역을 크게 하여 위치제어의 정밀도를 증대시킨다. 앞장의 검토를 참조하여 설계된 작업영역은 18x18x18 cm이며, 롤(180°)-피치(120°)-요(120°)의 운동을 갖는다.

각 조인트들은 기어대신 케이블과 폴리로 연결되어 소형 직류모터로 구동되므로 조인트 백래쉬와 마찰, 관성을 줄이고, 역구동성을 향상시키고, 조작자의 힘

해상도를 증대시킨다. 장력조절장치를 사용하여 케이블의 장력을 증대시켜 조인트 콤플라이언스(compliance)를 줄인다. 핸드컨트롤러와 슬레이브 각 조인트에 부착된 엔코더의 위치오차를 이용하여 슬레이브가 외부 물체에 가하는 힘이 조작자에게 반향되도록 한다. 상하 직선운동을 하는 세 번째 축의 무게는 평형물(counterweight)로 균형을 이루었으며, 회전축들의 무게는 구동모터들을 균형 있게 배열하여 보상하였다. 핸드컨트롤러의 베이스는 4개의 선형가이드로 구성된 공압식 지지장치에 의하여 지탱된다. 이동이 가능한 이 지지장치는 발 페달로 구동되며 핸드컨트롤러 베이스의 고도를 조종할 수 있으므로 조작자에게 편안한 조종위치를 제공한다.

3.3 그래픽 시뮬레이션

그래픽시스템은 제작 전에 장치를 미리 시험해 볼 수 있는 수단을 제공한다. 그래픽 소프트웨어(ROBCAD)를 사용하여 Fig. 3과 같이 설계된 핸드컨트롤러의 기구학적 특성 및 기계적 조작성을 시험, 평가하였다.

4. 결론

본 논문에서는 원격조작에서 요구되는 범용형 힘방향 6자유도 핸드컨트롤러 설계를 수행하였다. 이미 개발된 핸드컨트롤러들의 분석을 통하여 설계에 필요한 조건들을 마련하여, 이를 설계에 적용하였다. 개발된 핸드컨트롤러는 직교형의 직렬링크구조로서 조작자의 위치, 자세 명령을 슬레이브에 전달하고, 슬레이브의 외부 접촉력을 조작자에게 피드백할 수 있다. 당 핸드컨트롤러는 Titan 매니퓰레이터와 인터페이스 하여 증기발생기 mock-up에서 실험적으로 평가하고, 수정, 보완될 예정이다.

참 고 문 헌

1. R. C. Goertz, *et al.*, "ANL Mark E4A Electric master-slave manipulator," Proc. 14th Conf. *Remote Systems Technology*, pp. 115-123, 1966.
2. "원전 1차계통 고방사선지역 점검보수 로봇시스템 개발" 한국원자력연구소, 최종보고서, KAERI/RR-1720/96, 1997.
3. J. Vertut, *et al.*, "The MA-23 Bilateral Servomanipulator system," Proc. 24th Remote Systems Technology, pp. 175-187, 1976.

4. A. K. Bejczy and J. K. Salisbury, "Kinesthetic Coupling Between Operator and Remote Manipulator," Proc. ASME Computer Technology, pp. 197-211, 1980.
5. H. Das, *et al.*, "Operator performance with alternative manual control modes in teleoperation," *Presence*, Vol. 1, No.2, pp. 201 - 217, 1992.
6. D. A. McAfee and T. Ohm, "Teleoperator Subsystem/Telerobot Demonstrator: Force Reflecting Hand Controller Equipment Manual," JPL D-5172, 1988.
7. N. Matsuhira, *et al.*, "Development of A Multipurpose Hand Controller for JEMRMS," 24th Aerospace Mechanisms Symp., pp. 105-120, 1990.
8. "A Compact 6 Degree of Freedom Force Reflecting Handcontroller," Cybernet Product Catalog, 1996.
9. "Bilateral Stewart Platform" System Manual, AEA Technology, 1994.

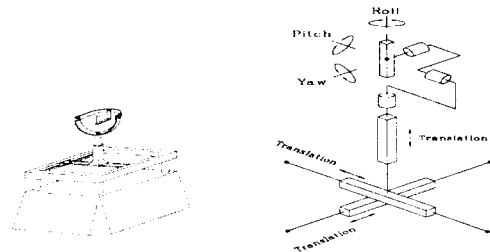


Fig. 2 The configuration and kinematics of the new hand controller

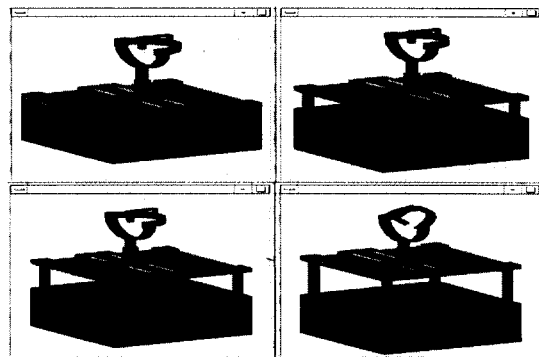


Fig. 3 The graphic simulation of the new hand controller