

6자유도 원형체외고정기 조정을 위한 자동화 시스템 개발에 관한 연구

정상길¹, 박범석², 심형준¹, 한창수³, 한정수⁴

¹한양대학교 메카트로닉스공학과, ²한양대학교 정밀기계공학과,
³한양대학교 기계정보경영학부, ⁴한성대학교 기계시스템공학부
(2004년 7월 19일 접수, 2004년 12월 14일 채택)

A Development of the Automated System for Adjusting the Hexapod Circular Fixator

S. G. Jung¹, B. S. Park², H. J. Sim¹, C. S. Han³, J. S. Han⁴

¹Dep. of Mechatronics Engineering, Hanyang Univ.,

²Dep. of Precision Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

³Dep. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.,

⁴Dep. of Mechanical Engineering, Hansung Univ.

(Received July 19, 2004. Accepted December 14, 2004)

요약 : 본 논문에서 우리는 6자유도 원형 체외고정기의 조정을 위한 자동화 시스템에 관한 연구를 진행하였다. 6자유도 원형체의 고정기 자동화 시스템은 HCF(Hexapod Circular Fixator)라는 체외 고정기를 자동화 한 것으로 HCF의 조정을 위한 소프트웨어와 HCF의 스트럿을 조정해주는 자동화 스트럿으로 구성된다. HCF는 일리자로프 고정기의 한 형태로서, 대표적인 병렬형 로봇인 스튜어트 플랫폼과 유사한 기구적 구조를 갖는다. HCF 조정 소프트웨어는 복잡한 골 변형의 교정을 쉽게 하기위한 소프트웨어로서, X-ray 사진을 이용하여 데이터를 획득한 후, 이 데이터를 HCF 조정 소프트웨어에 입력하여 스트럿의 길이 조정 값을 구한다. 또한 여기서 구한 스트럿 길이 조정 값을 자동화 스트럿 컨트롤러로 입력하여, 자동화 스트럿은 계획된 위치만큼 자동으로 구동된다. 또한 HCF 조정 소프트웨어 데이터는 자동화 스트럿 없이 일반 스트럿을 이용하여 HCF 조정을 위해 사용될 수 있다. 제안된 시스템은 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

Abstract : In this article, we present an automated system for adjusting the 6 degree of freedom (D.O.F.) circular fixator. The system includes a scheduling software to adjust the Hexapod Circular Fixator (HCF) and an automated strut with the ability of the multiple synchronized motion and independent motion. The HCF was designed to control a 6 D.O.F. Ilizarov fixator and its mechanism. The HCF adjustment software evaluates each value of altered length of the HCF struts to correct the complex skeletal deformity by using the X-ray data of the patient. The data of HCF adjustment software feed into the automated strut system which provides the scheduled adjustment. Then, the automated strut is synchronized by input data. Also the data of HCF adjustment software can be used to adjust HCF without automated struts. The proposed HCF system was verified by experiments.

Key words : The automated system, Hexapod Circular Fixator (HCF), HCF adjustment software, Stewart Platform, Automated strut

서 론

체내 고정기와 체외 고정기는 신체의 피부, 근육, 신경 및 혈관과 함께 신연력에 의해 조직의 생성력을 활성화시키어 골 생성을 이루는 원리로 초기에는 심각한 골 장애를 가진 어린이들을 위한 기술을 하였으나, 현재는 사지연장술, 선천성 질환이나 불유합 등 해결하기 어려운 골 질환에 적용하여 우수한 결과를 보이고 있다.[1,2]

현재 시술되고 있는 고정기는 체외 고정기와 체내 고정기가 있으며, 각각 고유한 장단점이 있다. 체내 고정기에 의한 교정은 시술 후 외적으로 보기 좋아 환자의 만족도가 높다는 장점이 있으나, 체외 고정기와 비교해 낮은 시술 성공률을 보인다. Holt의 연구 결과에 따르면 약 26%정도가 체내 고정기를 사용한 수술에 실패한다고 파악하고 있다.[3] 이에 비해 체외 고정기는 체내 고정기와 비교해 생체 역학적으로 안전하다는 가장 큰 장점을 갖고 있어서 골 다공증 환자도 안전하게 사용할 수 있다.[4,5] 체외 고정기로는 원형 체외고정기와 편측 체외고정기가 있다. 편측 체외고정기는 굵은 편을 편측 체외고정기에 부착하여 골을 연장시키는 방법으로 장착이 간편하고 근육의 손상을 최소화 할 수 있으며, 복잡한 골의 각 변형에 이용되기 보다는

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호:R01-2003-000-11635-0) 지원으로 수행되었음.

통신저자 : 정상길, (425-791) 경기도 안산시 사1동
한양대학교 기계공학과 제어공학실험실

Tel. 031-400-4062 / 019-9163-1447

Fax. 031-406-6242 / 031-406-5550

E-mail. jungsg95@hotmail.com

단순한 골의 길이 연장에 사용된다. 원형 외고정기는 일리자로프(Ilizarov) 고정기라고도 하며 역학적으로 회전 변형력을 포함한 외력에 강하고, 수술 후 잔존하는 변형의 교정에 우수하다. 특히, 신경혈관 손상이 염려 될 때 유용하게 사용된다.

일리자로프 고정기의 장점과 로봇 암의 원리를 이용한 원형 체외고정기가 Fig. 1 Hexapod Circular Fixator (HCF)이다.

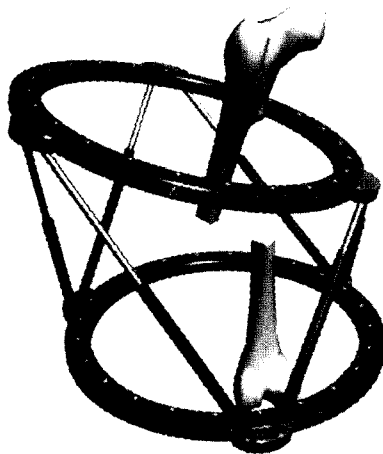


그림 1. 6자유도 원형 체외 고정기
Fig.1. HCF (Hexapod Circular Fixator)

6자유도 원형 체외고정기인 HCF는 2개의 링 사이를 6개의 스트럿이 V자로 연결한 기계적 구성을 갖고 있다. HCF는 각 스트럿의 길이를 조정하여 상단 링과 하단 링의 자유도를 극대화함으로써 각 변형, 회전 변형 및 전위 변형을 동시에 교정할 수 있도록 한다.[14]

본 연구에서 우리는 HCF를 자동화한 HCF 자동화 시스템을 개발 하였다. HCF 자동화 시스템은 HCF 조정 소프트웨어와 자동화 스트럿 두 부분으로 구성이 된다.

HCF는 스트럿 길이 조정을 이용하여 상단 링과 하단 링의 위치를 조정한다. 그러나 기구적 해석의 복잡성 때문에 직관적으로 스트럿의 길이를 조정하기에는 많은 무리가 따른다. 그래서 시간경과에 따른 스트럿 길이의 변화를 쉽게 알 수 있도록 HCF 구동 소프트웨어를 개발 하였으며 HCF 구동 소프트웨어에서 계산된 데이터를 이용하여 스트럿 길이 조정을 자동으로 해줄 수 있는 자동화 스트럿 시스템에 관해 연구를 진행 하였다.[10] 자동화 시스템을 이용해 데이터를 입력하는 것으로 환자들이 오랜 시간 병원에 입원해 치료하는 기간을 단축시켜 집에서 치료하는 것을 가능하게 할 것이다.

6자유도 체외고정기의 기구적 해석

HCF는 스튜어트 플랫폼이라는 6자유도 병렬형 메커니즘과 기구 구성이 유사하다. 상단 링과 하단 링 그리고 길이 조정을 할 수 있는 스트럿과 링을 연결 시켜주는 조인트로 구성되어 있다. 상단 링과 하단 링은 2개의 반원 링의 결합으로 이루어져 있다. 스튜어트 플랫폼의 기구적 특성인 3자유도 위치 이동과 3자유도 각 변형이 가능하므로 골 연장과 동시에 골 변형에 대한 각 교정 또한 가능하다.

HCF는 시술되는 위치에 따라 기준 링이 달라진다. distal tibia 교정일 경우는 하단 링이, proximal tibia 교정일 경우는 상단 링이 기준이 되며, femur 교정일 경우는 하단 링이 기준이 된다.

하단 링이 기준일 경우는 Fig.3 과 같이 나타낼 수 있으며 상단 링의 경우도 또한 같은 계산법을 이용 할 수 있다.

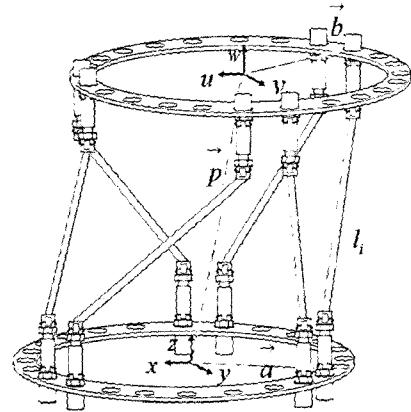


그림 2. 일반적인 HCF
Fig. 2. General HCF

일반적인 HCF는 Fig.2와 같이 나타낼 수 있으며 상단 링과 하단 링의 관계식을 구할 수 있다. 또한 여기서 나온 관계식을 이용하여 뼈의 교정을 위한 식을 구할 수 있다.

unit vector를 u, v, w 라 하고, rotation matrix를 R 이라 하면 다음 과 같은 관계식이 성립하게 되며 스트럿 길이를 구할 수 있다.

$$R = \begin{bmatrix} u_x & v_x & w_x \\ u_y & v_y & w_y \\ u_z & v_z & w_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

i번째 스트럿의 벡터 루프 식은 (2)과 같이 쓸 수 있고 그 길이는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{l}_i = \vec{p} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i \quad (2)$$

$$l_i = \sqrt{(\vec{p} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)^T (\vec{p} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)} \quad (3)$$

여기서 l_i 는 각 스트럿의 길이 이고, \vec{p} 는 상단 링과 하단 링의 중심간 위치 벡터이고, \vec{a}_i 와 \vec{b}_i 는 각각 상단 중심과 하단 중심에서 각 조인트 사이의 벡터이다.

이 식을 기본으로 하여 HCF를 이용한 뼈 교정을 위한 식을 구할 수 있다.

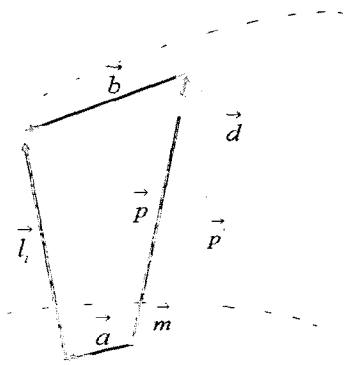


그림 3. Distal ring을 기준으로 한 HCF
Fig. 3. HCF with a criterion of distal ring

Fig.3 에서와 같이 \vec{m} 는 reference ring 중심과 reference bone 끝 사이의 벡터이고, \vec{d} 는 moving ring 중심과 moving bone 끝 사이의 벡터이며, 또한 \vec{p}' 은 reference bone 과 moving bone 사이의 벡터이다.

그러므로 벡터 \vec{p} 는 다음과 같이 표현 할 수 있고

$$\vec{p} = \vec{m} + \vec{p}' + R\vec{d} \tag{4}$$

식 (3)과 (4)를 이용하여 스트럿의 길이와 뼈 사이의 관계식을 구할 수 있다. 관계식은 다음과 같다.

$$l_i = \sqrt{(\vec{m} + \vec{p}' + R\vec{d} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)^T (\vec{m} + \vec{p}' + R\vec{d} + R\vec{b}_i - \vec{a}_i)} \tag{5}$$

여기서 나온 관계식은 HCF 구동 소프트웨어를 개발하는데 기초가 된다.[7,8,9,10]

HCF 자동화 시스템

HCF 자동화 시스템은 X-ray 사진을 이용하여 HCF 자동화 시스템에 필요한 데이터를 획득한 후, 이 데이터를 HCF 조정 소프트웨어에 입력하여 매일 시술해야할 시술 데이터를 구한다. 시술 데이터는 HCF 자동화 시스템 컨트롤러로 입력되고 매일 매일 시술 되어야 하는 양 만큼 스트럿은 스케줄에 따라 자동으로 구동 하게 된다.

1. 자동화 스트럿

1) 자동화 스트럿 설계

스트럿을 자동화하여 fixator를 움직이기 위해서는 구동장치(actuator)가 필요하다. 그러나 일반적인 구동장치는 회전운동을 하며, 스트럿에 이용하기 위해서는 회전 운동을 선형 운동으로 변환시킬 필요가 있다.

일반적으로 체의 고정기에는 telescopic 타입과 screw 타입의 fixator를 사용한다. 구동장치의 회전 운동을 직선 운동으로 변환하고, 정밀한 조정을 위해서는 너트를 돌려 스트럿 길이를 변화시키는 screw 타입의 fixator가 적합하다. 너트의 회전율과 길이 변화율은 정확히 비례한다. 또한, 구동장치는 환자들이 이용하기 적합하도록 크기가 작고, 무게가 적게 나가야 한다.

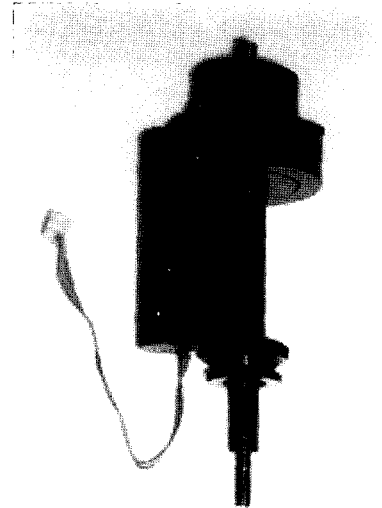


그림 4. 자동화 스트럿
Fig. 4. The automated strut

스트럿과 구동장치와의 관계를 고려해 보았을 때 screw 타입의 fixator와 DC 모터로 구동장치를 사용하는 것이 자동화에 적합하다.

스크류를 선정하기 위해서는 스크류의 타입, 크기, pitch, lead 등 스크류의 성질을 고려해야한다. 결정된 스크류는 1mm의 lead를 갖는다. 즉, pitch는 1mm이고 스크류는 1턴당 1mm움직인다. 이러한 특성으로부터 회전, 선형변환 요소는 1mm/rev로 간단히 나타낼 수 있다.

HCF 스트럿은 정밀한 제어가 필요하고 환자의 하중을 이겨낼 수 있는 토크가 필요하다. 실제의 경우 스트럿 하나가 부담하는 하중은 6개의 스트럿에 분산되어 가해지므로 이상적인 경우 개개의 스트럿에는 환자 체중의 1/12의 하중이 가해지게 된다.

즉,

$$P_s = \frac{P_H}{6} \tag{6}$$

$$P_H = \frac{W}{2} \tag{7}$$

$$\therefore P_s = \frac{W}{12} \tag{8}$$

P_s = 스트럿 한 개당 가해지는 체중

P_H = HCF에 가해지는 체중

W = 환자의 체중

그러므로 환자의 체중을 80kgf로 생각한다면 스트럿 한

개당 가해지는 체중은 7kgf를 밀둘게 된다. 그러나 환자의 체중뿐만이 아니라 근육에 가해지는 힘, 축 방향에 대해 각도를 갖는 경우 등 여러 가지 외적 요소에 의해 스트럿에 더 많은 하중이 가해질 수 있음을 고려해야한다.

또한 환자에게 부담을 주지 않는 무게와 크기를 가져야 한다. 그러므로 모터는 크기 대 성능비가 최적화된 모터를 선택해야한다. 또한 빠른 속도보다는 정밀하고 안전하게 작동할 수 있도록 낮은 속도에서 큰 토크를 발생시켜야한다. 이 점을 고려하여 기어 비를 충분히 크게 하여 낮은 속도에서도 큰 토크를 내도록 설계하였다. 스트럿의 모터 속도는 1 mm/sec이고 최대하중은 200kgf이다.

2) 컨트롤러 설계

자동화 스트럿 시스템 컨트롤러는 스케줄 데이터를 처리하여 스트럿 길이를 조정하도록 설계되었다. 즉, Fig. 5에서와 같이 HCF 구동 소프트웨어에서 데이터를 계산하고 컨트롤러에서 계산된 데이터를 입력받아 fixator를 원하는 길이만큼 움직이게 되고 HCF는 원하는 위치로 이동하게 된다.

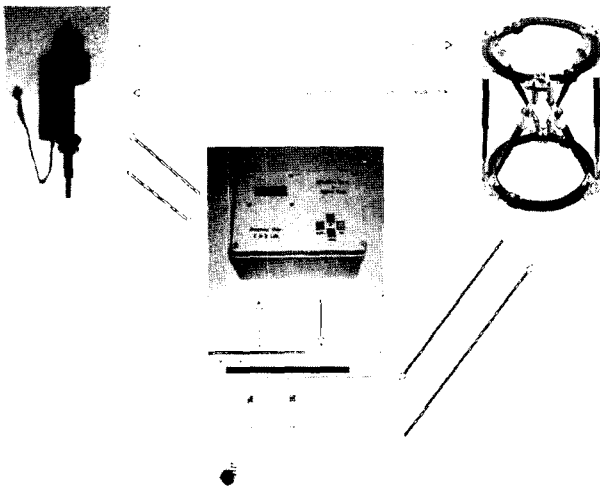


그림 5. 자동화 스트럿 시스템
Fig. 5. The automated strut system

스트럿 컨트롤은 시스템의 주 컨트롤러(master controller)가 하위 컨트롤러(slave controller)를 작동시키도록 설계되었다. 여러 개의 스트럿이 각각 독립적으로 움직이는 것이 아니라 주 컨트롤러에서 주기적인 신호를 보내 하위 컨트롤러를 동조시킨다. (Fig.6)

주 컨트롤러는 PC에서 데이터를 읽어 들일 수 있고, 스케줄 데이터를 조정할 수 있는 기능이 있다. 주 컨트롤러를 갖는 스트럿을 주 스트럿(master strut) 이라고하고 그 외의 스트럿들을 하위 스트럿(slave strut)이라 하는데 주 컨트롤러는 스케줄 데이터를 저장 재생하고 주 스트럿 및 하위 스트럿에 요구되어 지는 계산 또한 저장, 재생한다.

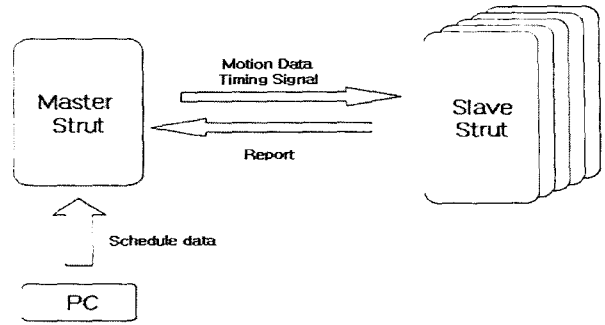


그림 6. 시스템 구성
Fig. 6. Consist of system

3) 스트럿 구동

스트럿은 스케줄 데이터에 의해 구동이 된다. 구동 되는 스트럿은 환자에게 무리를 주지 않기 위해 한번에 입력된 데이터만큼 움직이는 것이 아니라 15에서 720까지 나누어져 분할된 만큼 움직이게 된다. 스트럿의 구동은 다음의 몇 개의 상태 - '준비', '데이터 배분', '구동 시작', '구동', '결과 확인' - 의 순서에 따라 스트럿이 구동하게 된다.

실험 및 결과

1. 실험

HCF자동화 시스템의 실험은 뼈 모형을 이용하여 AP / Lateral view 방향의 변형량 및 움직임 데이터를 얻은 후 이를 HCF 구동 소프트웨어에 입력하고, 여기서 나온 데이터는 다시 자동화 컨트롤러로 입력되어져 스트럿이 구동하게 된다. 이 과정에서 구동소프트웨어의 오차를 확인하기 위해 실제 모형을 이용하여 검증하고, 자동화 시스템은 구동 소프트웨어에서 얻은 데이터를 주 스트럿(master strut)에 적용하여 작동시키고 이를 바탕으로 오차를 확인한다. (Fig.7)

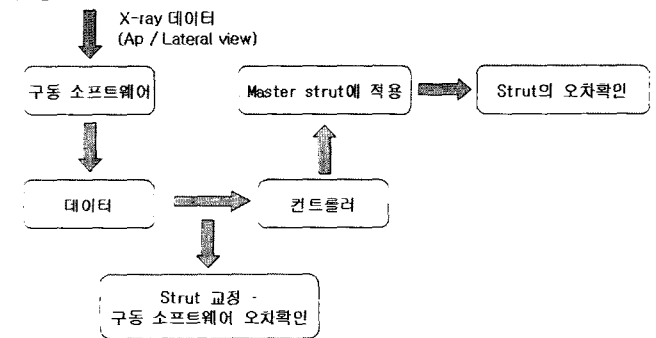


그림 7. 실험 방법
Fig. 7. Experiment method

실제의 경우에는 X-ray 사진을 이용하여 데이터를 구하지만, 이 실험에서는 사진을 이용하여 데이터 값을 구한다. 교정전의 사진은 Fig. 8이며, 이 사진의 데이터를 이용해 실험을 진행한다.

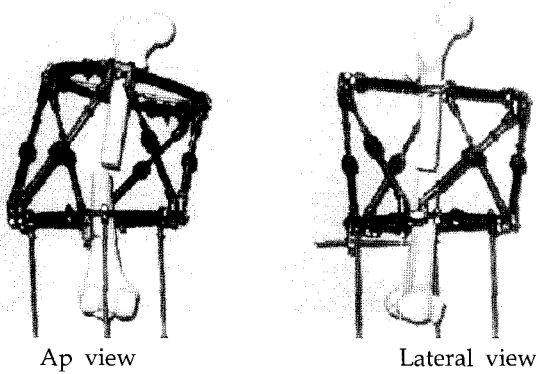


그림 8. 교정 전 사진
Fig. 8. Pre-operation

2. 실험 결과

Fig. 8의 사진을 이용하여 구동 소프트웨어에 변형량 및 읍셋 데이터를 입력한 후의 결과 값은 구동 소프트웨어에서 데이터 시트의 값이 나온다. 여기서 나온 데이터 시트를 HCF에 적용 시켜보면, Fig. 9의 상태가 된다. Fig. 9는 30일 동안의 과정의 결과이다. Fig. 9의 실험 결과 사진에서와 같이 구동 소프트웨어에 의해 얻은 데이터는 타당함을 확인 할 수 있었다.

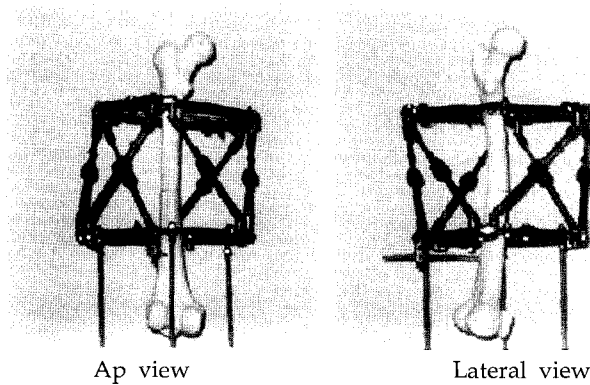
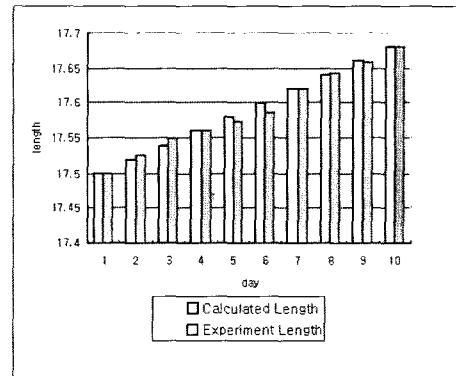
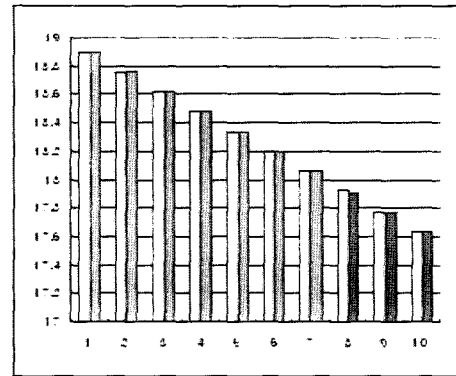


그림 9. 교정 후 사진
Fig. 9. Post-operation

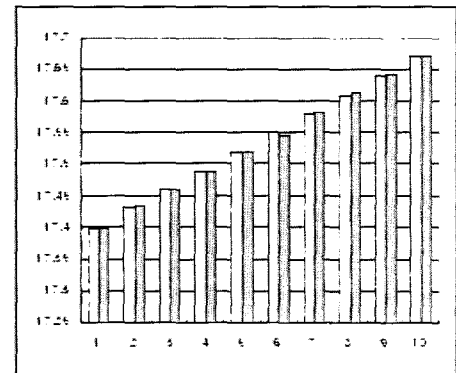
자동화 스트럿의 실험은 Fig.9의 구동 소프트웨어 실험에 사용된 데이터 값을 받아 자동화 스트럿에 입력시켰을 때의 길이 변화는 Fig. 10과 같이 나타났고, 그에 따른 오차는 Fig. 11의 그래프와 같은 결과를 보였다. Fig. 10에서와 같이 구동 소프트웨어에서 계산된 데이터와 실제 측정값과의 차이는 거의 없음을 알 수 있고, Fig. 11에서의 결과와 같이 오차는 무작위로 발생되며, 누적 오차는 증가하지 않음을 알 수 있다.



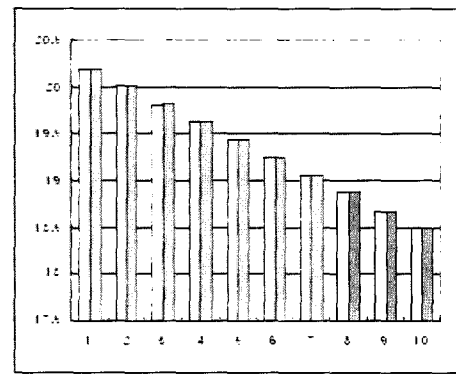
strut 1



strut2



strut3



strut4

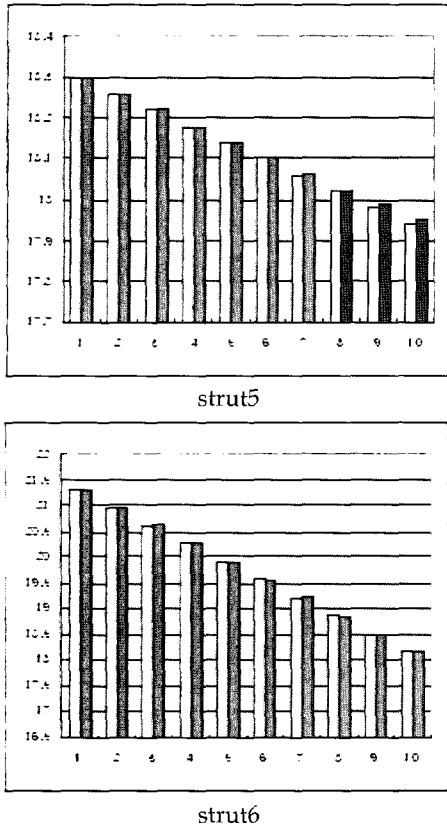


그림 10. 스트럿의 길이변화
Fig. 10. Lengths variation of the strut

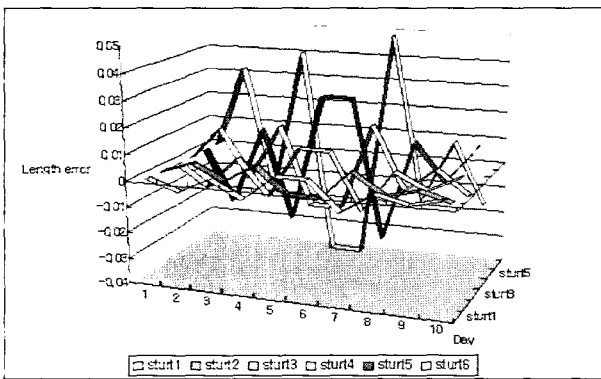


그림 11. 스트럿 에러
Fig. 11. Strut error

결론 및 고찰

본 논문에서 HCF 자동화 시스템에 관해 연구 하였다. 이 시스템의 목적은 6자유도 원형 체외 고정기인 HCF를 보다 정확하고 쉽게 사용하고자 하는데 있다. HCF 자동화 시스템은 크게 HCF 구동 소프트웨어와 자동화 시스템의 두 부분으로 나눌 수 있으며 HCF 구동 소프트웨어는 이 자체만으로도 기존의 6자유도 원형 체외 고정기에 이용하여 정확한 데이터를 얻을 수 있음을 실험을 통해 검증 하였다. 또한 자동화 스트럿 부분 또한 HCF 구동 소프트웨어

어 데이터를 이용한 실험에 의해 타당성이 검증 되었다. 본 연구에서 제안한 HCF 자동화 시스템은 복잡한 골 변형 등에 보다 빠르고 정확하게 시술될 뿐만 아니라 보다 더 편하게 사용될 수 있을 것임을 확인하였다. 추후 실험 데이터를 바탕으로 한 실제 임상 실험 또한 필요할 것이다.

참 고 문 헌

1. 황건성, "신연골생성 : 원리와 적용", 한양의대학술지, 제17권, 2호, pp.34-37, 1997
2. L. Martin, M. Farrell, K. Lambrenos, D. Nayagam, "Living with the Ilizarov frame: adolescent perceptions", Journal of Advanced Nursing, Vol.43, pp.478-487, 2003
3. ES. Holt, ST. Hansen ,KA. Mayo , "Ankle arthrodesis using internal screw fixation", Clin Orthop, Vol.268, pp.21-28, 1991
4. RC. Maurer ,WR. Cimino, Cox CV, "Transarticular cross screw fixation. A technique of ankle arthrodesis", Clin Orthop, Vol.268, pp.56-64, 1991
5. BJ. Hawkins , RJ. Langerman , DM. Anger, "The Ilizarov technique in ankle fusion : a preliminary report", Bull Hosp Jt Kis, Vol.53, pp.17-64, 1993-95
6. C. Khodadadyan-Klostermann, M. Raschke, T. Mittlmeier, I. Melcher, N. P. Haas, "Ankle and pan-talar arthrodesis with Ilizarov composite hybrid fixation: operative technique and review of 21 cases", Foot and Ankle Surgery, Vol.7, pp.149-156, 2001
7. D. Stewart, "A platform with six degrees of freedom", in Proc. Inst. Mech. Engr, vol. 180, no. Vol.15, pp.371-386, 1965
8. E.F Fichter, "A Stewart platform-based manipulator: General theory and practical construction", Int. J. Pobotics Res., vol.5, pp.157-182, 1968
9. K. Liu, M. John. Fitzgerald, F. L. Lewis, "Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.40, pp.260-266, 1993
10. 박범석, 한창수, 한정수, 최인호, "6자유도 원형체외고정기 조정을 위한 오프라인 소프트웨어 개발에 관한 연구", 한국정밀공학회, 2003년도 춘계학술대회논문집, pp. 300-304, 2003
11. M. Raghavan, "The Stewart Platform of General Geomety Has 40 Configurations", ASME J. Mech. Des., Vol.115, pp.277-282, 1993
12. C. Reinholtz, D. Gokhale, "Design and Analysis of Variable Geometry Truss Robot", Proc. 9th Applied Mechanisms Conference, pp.48-53, 1987
13. F. Sternheim, "Computation of the Direct and Inverse Kinematic Model of the Delta 4 Parallel Robot", Robotersysteme, Vol.3, pp.1999-2003, 1987
14. 원주연, 심형준, 한창수, "로봇을 이용한 상지 재활 시스템에 관한 연구", 의용생체공학회지, Vol. 24, No. 4, pp.309-318, 2003