

3-D Glove를 이용한 손동작의 분석 시스템 개발

Development of a hand motion analysis system using a 3-D Glove

윤명환*, 권오채*, 한수미*, 박재희**, 이경태***

*: 포항공과대학교 산업공학과

** : 한국표준과학연구원 인간공학연구소

***: 대불대학교

Abstract

본 연구에서는 손동작(Hand Motion)과 수작업(Manual Task) 분석에 VR환경에서 사용되는 각도 측정 장갑(3-D Glove)을 이용하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서 개발된 손동작(Hand Motion)과 수작업(Manual Task)의 분석 시스템은 18-sensor Cyberglove™ 측정 시스템으로부터 측정된 angle data를 기초로 손동작이나 수작업에 대한 total muscle moment값과 total muscle excursion값을 구하고, digit와 joint의 moment값을 X, Y, Z방향별로 구하는 기능을 가지고 있다. 시스템의 구성은 : (1) Cyberglove™ System과 분석 시스템의 digital data 처리를 기반으로 하는 손동작의 측정 시스템 ; (2) Cyberglove™ System에서 얻어진 자료를 바탕으로 3차원 공간에서 손동작을 표현할 수 있는 Kinematic Hand Model ; (3) Hand Model과 Cyberglove™ System을 기반으로 3차원에서 손동작의 역학적 분석을 할 수 있는 3-D Hand Biomechanical Model ; 등으로 되어있다. 본 시스템은 Telerobotics, Medicine, Virtual Reality등 다양한 분야에 응용이 가능하며, 수작업에 관련되는 Product Design, Manual Control Device, Computer I/O Device의 설계에도 도움이 될 것으로 기대된다.

1 연구의 배경

인간공학 응용 연구의 시스템화를 위한 가장 필수적인 기술은 자세 분석(Posture Analysis), 혹은 동작 분석(Motion Analysis) 기술이다. 이는 응용 대상의 주요 연구 부문이 인체 동작과 인체와 외부 환경과의 Interaction의 세밀한 분석을 포함하여야 하기 때문이다. 이러한 자세 분석 또는 동작 분석 기술 중에서도 가장 중요하며, 응용 범위가 넓은 것은 손동작(Hand Motion) 또는 수작업(Manual Task)에 관한 자세 분석 기술이라고 할 수 있다. 최근의 통계에 의한 Robotics 혹은 VR

Technology 중 수작업에 관련되는 부분이 70%를 넘는 것으로 알려져 있고, 현재 가장 활발히 연구되고 있는 분야이다.

인간 공학 분야에서 자세 분석은 측정 장치의 특성에 따라 Camera와 Video에 의한 방법, 신체에 부착된 Sensor나 Marker를 통한 측정 방법 등이 있으며 여러 가지 장치들이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 본 연구의 대상이 되는 수작업(Manual Task)이나 손동작(Hand Motion)의 경우, 이러한 Marker Technology 나 Video-Based System이 효율적이지 못하다. 그 주요한 이유는 손의 크기,

동작의 정밀도와 복잡성을 위의 장치에 의해서 정확히 측정하기 어렵기 때문이다. 또한 대부분의 자세 분석 시스템이 신체 전체의 동작과 작업을 주 대상으로 개발되었기 때문에 같은 시스템을 손동작에 작용하는 데에 어려움이 있다. 이러한 배경 하에서 본 연구에서는 손동작(Hand Motion)과 수작업(Manual Task) 분석을 VR환경에서 사용되는 3-D Glove를 이용하는 방법을 개발하였다. Glove를 이용한 수작업의 응용 분야는 Telerobotics, Medicine, Virtual Reality, Biomechanics 등과 같이 다양하며, 궁극적으로 수작업에 관련되는 Product Design, 특히 수공구, 도구, Manual Control Device, Computer I/O Device의 인간공학적 설계에도 Guideline을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

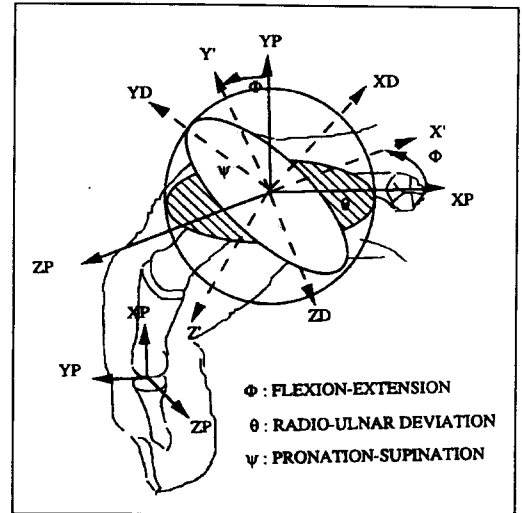
2 수작업 분석 Program

2.1 Program의 변수 설명

Hand model은 여러 개의 digit과 muscle를 가지므로, 분류 방법 (scheme)을 정의하는 것이 필요하다. 네 개의 주요 분류 변수들은 계산에 포함되어진다.

- 1) Digit : 손가락은 엄지에서 소지까지를 1에서 5로 coding한다.
- 2) Hand muscle : 손에서의 두 개의 주요 근육은 네 손가락 각각에 대해 FDP(flexor digitorum profundus)와 FDS(flexor digitorum superficialis)이고, 엄지에 대해서는 FPL(flexor pollicis longus)이다.
- 3) Joints : 네 개의 joint인. Wrist joint, MP(metacarpophalangeal), PIP(proximal interphalangeal), DIP(distal interphalangeal)가 있는데, 앞에서부터 1에서 4까지 coding한다. 엄지에 대해서도 일관성을 유지하기 위해 네 번째 joint는 없이 같은 규칙을 적용하였다.
- 4) Direction : Cartesian 3-D 좌표는 프로그램을 통해 사용되어졌다. Flexion-extension

movement는 Y-Z 평면으로 정의 되며, 방향은 1이다. Radial-ulnar deviation movement는 X-Y 평면으로 정의 되며, 방향은 2이다. Axial rotation movement는 X-Z 평면으로 정의 되며, 방향은 3이다. ([그림 1] 참조)



[그림 1] 좌표계의 방향각

Torque 계산에 사용되어지는 force와 좌표 transform matrix의 notation은 다음 방법(scheme)에 의한다.

- i : digit (1:엄지, 2:인지, 3:중지, 4:약지, 5:소지)
- j : muscle (1:FPL, 2:FDP, 3:FDS, and 엄지 이외의 digit은 FPL에 대해 0이다.)
- k : joint (1:PIP, 2:MCP, 3:CM, 4:wrist)
- l : direction (1:radial-ulnar, 2:flexion-extension, 3:rotation)

2.2 Basic data

Finger strength를 계산하는 데 요구되는 data는 tendon moment arm과 phalange의 길이이다. Joint force와 moment를 계산하는 데에는 external load의 크기와 방향에 관한 data가 필요하다. 이들 data 중에서 tendon moment arm은 Brand (1985)의 연구 결과이고, phalange의 길이에 관한 data는 An et al(1983)로부터 얻어졌다. 그러나, phalange의 길이

는 손 자세 실험에 참여하는 subject들에 대한 측정치다. 이 측정된 길이의 평균값은 모든 subject에 대해 joint torque와 force를 계산할 때 사용된다. 특정 작업에 관한 개별적인 손 자세를 계산하기 위해서는 An et al(1983)의 길이 data를 사용한다.

Joint 관절은 Eulerian transformation matrix 계산에 의해 결정된다. Force exertion의 FSR 측정은 엄지는 수직상 방향으로, 엄지를 제외한 나머지 손가락은 수직하 방향으로 하는데 모든 force component는 local 좌표에 수직 component라고 가정되어진다. 힘의 작용점은 모든 tool grip에 대해 joint 부분(segment)의 중심점이라고 가정한다. 그리고, 모든 pinch 형태의 손 자세는 단지 손끝에서만 force component를 가진다고 가정한다. 또, External load의 크기는 단위 힘의 비율로 정의된다.

2.3 Coordinate transformation

손가락이 중심 구성에서 다른 위치에 있을 때, 특정한 joint에서의 proximal 좌표계는 간단한 rotational transformation 시스템을 통해 distal 좌표계와 관련을 가질 수 있다. Eulerian angle matrix는 모든 필요한 좌표를 손목에 근거한 global 좌표로 transform하는데 사용되어진다. ([그림 2] 참조)

만일 matrix $[DM_{ij}]$ 를 i 좌표계로부터 j 좌표계의 transformation이라 한다면, DIP joint에서 wrist joint로의 전반적인 transformation $[DM_{ij}]$ 는 손목을 원점으로 한 연속적인 작용이다.

$$[DM_{ij}] = [D_i] \dots [D_{i(j-1)}] [D_j] \quad (1)$$

where, i : finger digit

j : joint

DM_{ij} : finger i 와 joint j 의 global 좌표

D_j : i 번째 finger과 $(j-1)$ 번째 joint에서 정의된 finger i 와 joint j 의 local 좌표

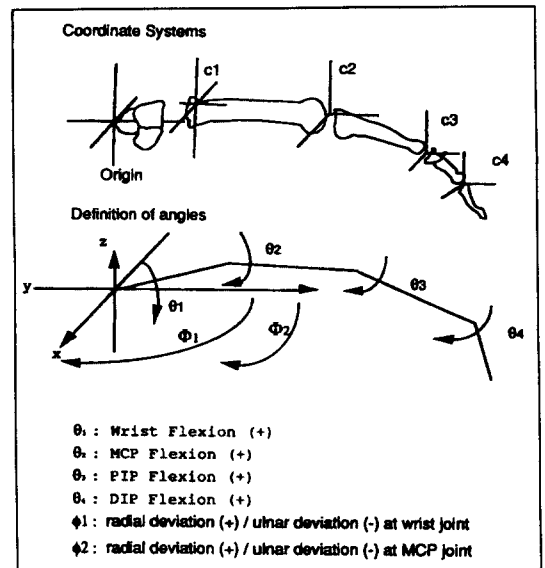
정의되어진 좌표 방법(scheme)에 근거하여, joint center에 관한 tendon의 위치는 global 좌표로

transform된다. '방향 코사인' matrix라는 용어는 An et al(1989)에서 이 값을 가리키는 것이다. 이 '방향 코사인' matrix는 모든 5개의 손가락과 4개의 모든 joint에 대해서 joint center에 관한 tendon의 3-D 위치로 정의되어진다. 그러므로, local 좌표에서 방향 코사인 matrix A_{ijkl} (digit i , muscle j , joint k , direction l)의 값은 joint center로부터 local 원점까지의 transform된 좌표의 값이다.

$$[A_{ijkl}](proximal) = [DM_{ij}][A_{ijkl}](distal) \quad (2)$$

where, A_{ij} : i 번째 finger과 $(j-1)$ 번째 joint에서 정의된 finger i 와 joint j 의 방향 코사인

Joint center로부터 정의된 방향 코사인의 초기 값은 An et al(1989)로부터 얻어졌다.



[그림 2] 손의 관절각과 좌표계의 정의

2.4 Calculation of joint moment

Digit length

An et al(1983)로부터의 data는 손 길이 정보에서 부분(segment) 길이를 얻는데 사용되어진다. 그 data는 [표 1]에 나타나 있다.

$$SL_{ij} (segmentlength) = a * HL_{ij} (handlength) \quad (3)$$

External force and moment

Joint moment의 계산에 있어서는 단지 flexion-

extension angle만이 고려되어진다. 각 joint에서 정의된 moment는 앞의 joint moment의 합이며 각 joint에서의 flexion angle로 발생한 additional moment이다. Joint moment의 계산 식은 다음과 같다.

$$[M]_{ij} = [SL]_{ij} * \cos(F) + [M]_{i(j-1)} \quad (4)$$

where, F : flexion-extension angle
 $[M]_{i(j-1)}$: 이전 joint의 moment arm
 i : digit (1 to 5)
 j : joint (1 to 4)

[표 1] 손길이로부터 각 관절 길이를 추정하기 위한 계수

Digit	Proximal			Distal
	1	2	3	4
1	0.118±0.005 (0.53)	0.251±0.004 (0.66)	0.196±0.003 (0.79)	0.158±0.002 (0.86)
2	0.463±0.003 (0.96)	0.245±0.001 (0.99)	0.143±0.003 (0.83)	0.097±0.002
3	0.446±0.003 (0.92)	0.266±0.003 (0.85)	0.170±0.003 (0.69)	0.108±0.003 (0.56)
4	0.421±0.004 (0.88)	0.244±0.003 (0.77)	0.165±0.002 (0.99)	0.107±0.004 (0.63)
5	0.414±0.003 (0.93)	0.204±0.002 (0.91)	0.117±0.002 (0.76)	0.093±0.003 (0.49)

2.5 수작업 분석 프로그램의 구조

18-sensor Cyberglove™라는 측정 시스템으로부터 측정된 angle data들을 가지고 그 한 손동작에 대한 각 digit들의 total muscle moment값과 total muscle excursion값을 FDP와 FDS에 대해 각각 구하고, 또한 각 digit들과 각 joint들의 moment값도 X, Y, Z방향별로 각각 구하는 program을 구현하였다. 단, 이 program은 C-language으로 구현되었는데, 'Yun M. H.(1994)'의 모형을 따르고 있다.

현재 Data 입·출력의 형태는 화일 입·출력의 형태를 기본으로 하고 있으나, 추후 측정 시스템과의 유연성이 확보된다면 화면 입·출력의 형태를 최종 목표로 하고 있다.

이 프로그램의 구성을 살펴보면, 측정 시스템으로부터 얻어진 angle data와 force data를 가지고, 먼저 Armstrong and Chaffin(1978)의 아래 수식을 사용하여 tendon excursion을 계산한다.

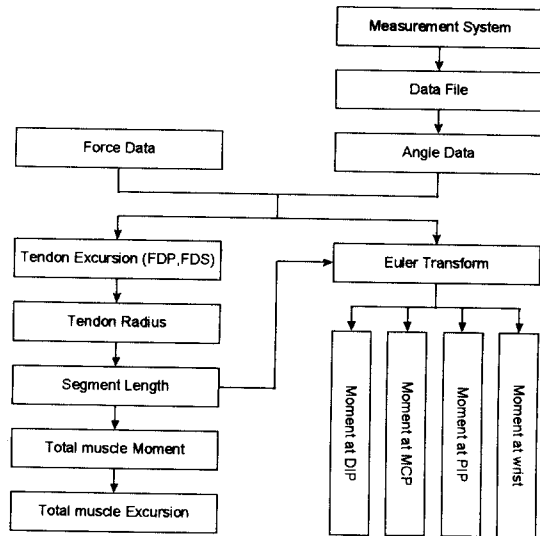
$$\text{Excursion(mm)} = 0.1034*(x5) + 0.00421*(x4)*(x5) - 0.0162*(x3)*(x5) - 0.03043*(x1)*(x5) + 0.06818*(x2)*(x5) + 0.03679*(x1)*(x3)*(x5) \quad (5)$$

where, x1 = 1 for PIP joints, 0 for others
 x2 = 1 for DIP joints, 0 for others
 x3 = 1 for FDP tendon, 0 for FDS tendon
 x4 = joint thickness (mm)
 x5 = joint angle (degrees from straight line)

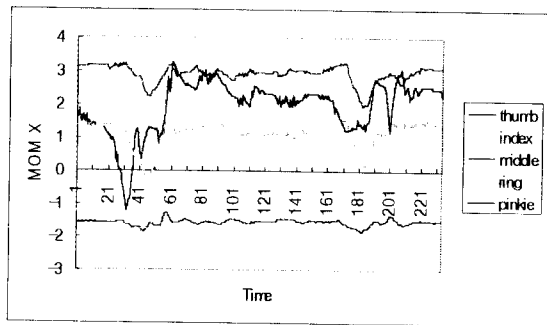
그리고, [표 1]에 나와 있는 Buchholz et al(1992)의 비례계수를 이용하여 손가락의 segment length를 구한다. 그 다음에 total muscle moment와 total muscle excursion을 구할 수 있다.

다른 한편으로는 Euler transform을 사용하여 각 digit들과 각 joint들의 moment값을 X, Y, Z방향별로 구해낸다.

이상의 간략한 flowchart는 [그림 1]에 나타나있다. [그림 2]는 program 수행의 예로서 시간의 변화에 따른 MCP joint에서의 X방향 (flexion/extension) moment들의 변화량을 모든 digit에 대하여 시간축으로 나타낸 것이다.



[그림 1] 분석 프로그램의 Flowchart



[그림 2] MCP joint에서의 X방향 moment

3 결론 및 추후 연구 방향

본 연구에서는 Cyberglove™ System에서 얻어진 자료를 바탕으로 3차원 공간에서 손동작을 표현할 수 있는 Kinematic Hand Model이 구축되었다. 3-D Kinematic Hand Model은 Cyberglove™에서 제공되는 관절각 이외에 인체 측정치에 의한 관절 길이 자료, 좌표 변환 체계, graphic module등을 갖추고 있다. 또한, Hand Model과 Cyberglove™ System을 기반으로 3차원에서 손동작의 역학적 분석을 할 수 있는 3-D Hand Biomechanical Model이 개발되었다. 3-D Hand Biomechanical Model은 Tendon Excursion, Joint Moment, Muscle Force Estimation 등의 계산 능력을 갖추고 있으며, 생체 역학적 분석 지수를 real time으로 제공할 수 있다.

본 연구에서 개발된 수작업 시스템은 제품

사용성 평가, 수공구 및 Hand Tool의 설계, Robot 및 가상 현실 등 많은 분야의 응용이 기대된다.

References

- An, K. N., Ueba, Y., Chao, E. Y. C., Cooney, W. P. and Linscheid, R. L.(1983) Tendon excursion and moment arm of the index finger muscle. Journal of Biomechanics, 16:419-425.
- Armstrong, T. J. and Chaffin, D. B.(1978) An investigation of the relationship between displacements of the finger and wrist joints and the extrinsic finger flexor tendons. Journal of Biomechanics, 11:119-128.
- Brand, P. W.(1985) Clinical Mechanics of the Hand. C.V. Mosby, Princeton, NJ.
- Buchholz, B., Armstrong, T.J., and Goldstein, S.A.(1992) Anthropometric data for describing the kinematics of the human hand. Ergonomics, 35(3):262-273.
- Yun, M.H.(1994) A hand posture measurement system for the analysis of manual tool handling tasks. Unpublished Ph. D. Thesis. Department of Industrial and Manufacturing Engineering, Penn State University.