Digital Hand Model과 3차원 CAD의 통합

발췌인 _ 이성수 _ 건국대학교 기계설계공학과 _ sslee@konkuk.ac.kr / 글 _ Natsuki MIYATA and Satoshi KANAI

1. 서론

인간으로서 존재할 수 있는 여러 가지의 손에 의한 제품 조작을 추정·제시하는 계산기에서의 손기능 Model, 이것을 Digital Hand라고 부른다. 제품 설계에 널리 이용되고 있는 3차원 CAD에 Digital Hand를 도입함으로서, 제품의 설계 단계에서 가상 Ergonomics 평가가 가능하다. 지금까지의 物理 Mock-up에 의한 시험을 없앨 수는 없으나, CAD Model 밖에 이용할 수 없는 Design 초기단계에서 인간공학적인 설계의 불합리함을 발견할 수 있다면, 시작(試作)이 줄어들게 되어 Cost down으로 이어지기 때문에 이의 실현에 대한 기대는 크다. 실제로 자동차나 항공기의 설계 현장에서는 제한된 기능이라고는 하지만 전신 Model을 사용한 시판 Software가 활용되고 있다.

산업기술종합연구소 Digital Human 연구센터(DHRC)와 홋가이도대학(北海道大學)은, 현재 공동으로 휴대전화나 펜형 Mouse와 같은 IT Interface 기기의 설계를 구체적인 사례로 하여 「Digital Hand와 Product Model을 통합한 ErgoDesign 지원 시스템」의 연구를 시작하고 있다. 이 프로젝트가 지향하는 시스템의 전체 모습은 다음과 같다. 우선 설계자는 시스템에 대하여 조금 크게, 또는 평균적인 사이즈 등을 상정하여, 사용자의 조건과 제품의 3차원 CAD 모델, 그리고 어느 버튼을 어떠한 순서로 누를 것인가 라고 하는 제품의 조작 방법을 시스템에 부여한다. 시스템은, 손으로 할 수 있는, 모든 가능한 조작을 생성하여, 조작성을 평가하고, 설계자에게 Feedback 한다. 이 평가 결과를 근거로 하여 설계자는 제품의 형상이나 조작 방법을 개선하게 된다(그림 1). DHRC에서는 Digital Hand Model과 제품 조작의 평가 방법을, 홋가이도대학에서는 개발중의 IT 기기 설계용 CAD 시스템을 기본으로 하여 통합시스템으로서의 실장(實裝)을 담당하고 있어서, 최종적으로는 시판 3차원 CAD 시스템의 Add on 기능으로서의 실장(實裝)을 예정하고 있다. 그림2는 맹인용으로 디자인된 엄지 손가락용 펜형 Mouse의 3차원 CAD 모델에 대하여 현재의 Prototype System

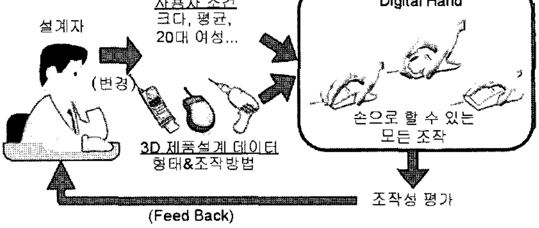


그림 1. 3차원 CAD · Digital Hand 통합에 의한 제품설계지원.

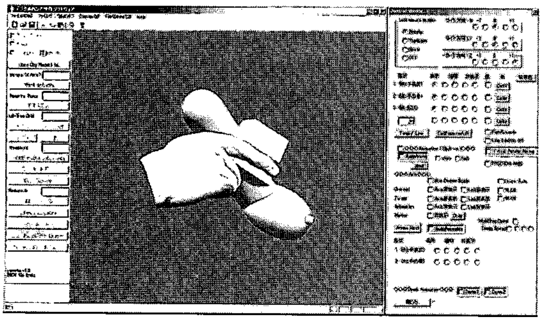


그림 2. ErgoDesign 지원 시스템에 의한 기본파지자세 생성예.

을 이용하여 파지자세(把持姿勢)를 추정하고 있는 예이다.

본 원고에서는 우선, 3차원 CAD에 Digital Hand를 도입한 통합시스템의 실현을 위한 기술적 과제를 제시하고, 각 과제에 대하여 설명한다.

2. 3차원 CAD · Digital Hand 통합시스템에 의한 설계지원의 기술적 과제

손으로 다루는 제품 가운데 특히 IT Interface 기기는 사각형상과 버튼이나 조그다이얼 등의 User Interface(UI) 요소의 배치가 설계 대상이 된다. 사각형상의 설계에는 합성된 파지상태의 손과 기기가 어느 순간의 관계로 잡기 용이함 · Fit 감 · 미끄러지기 어려움 등(파지용이성)을 문게된다. 이것에 대하여, UI 요소의 배치설계에는 어떤 파지상태의 손에 의한 버튼의 누르기 용이함 뿐만 아니라, 어느 버튼을 어느 순서로 몇 번 누를 것인가 라고 하는 일련의 조작이 용이한지 어떤지(UI 조작용이성)를 확인하는 것에 특징이 있다. 전자는 '어떻게 하여「손으로 할수 있는 모든 파지상태」를 만들어 평가할 것인가' 라고 하는 Digital Hand Model 로서의 과제가 있고, 후자는 'UI 조작이라고 하는 개념을 어떻게 도입할 것인가'라고 하는 CAD 시스템으로서의 과제가 있다. 이들 각각에 대한 기술적 과제를 아래에 제시한다.

2.1 손으로 할 수 있는 모든 파지상태의 생성과 평가

서두에서 기술한 것과 같이 전신(全身) Model을 사용한 소프트웨어가 현장에서 이용되고 있으나, 유감스럽게도 손을 이용하는 제품의 설계 설계 현장에서 적용되고 있는 것은 존재하지 않는다. 이것은 전신 Model을 사용하는 사이즈의 제품 평가에서는 그다지 문제가 되지 않았던 것들이, 손의 경우에는 무시할 수 없어서 지속적으로 상세한 기능 Model이 요구되기 때문이다. 물체 조작이라고 하는 관점에서, 정도(精度) 1mm 이하에서의 자세나 손가락 끝 위치를 재현할 수 있어야 한다. 만들 수 있는 손의 운동 Pattern은 전신으로 하는 동작 보다 훨씬 다양하고, 약 30이라고 하는 아주 고자유도 구조의 가능한 동작과 그 때의 피부표면형상을 생성할 수 있지 않으면 안된다. 물체와 접촉할 때의 피부 변형과 마찰의 복잡한 관계도, 조작성의 평가 등에서는 중요한 Factor로서 작용하기 때문이다. Digital Hand 에서는 이러한 기술적 과제에 도전하지 않으면 안된다.

손 Model을 CAD의 Add on 기능으로 한 시판 시스템으로서 HandyWorks와 VirtualHand가 있으나 이들 과제는 해결되지 않아서 실용화 단계라고는 말하기 곤란하다.

2.2 UI 조작 개념의 도입

현재의 CAD에서는 형상설계에 주안(主眼)이 놓여있어서 UI 조작 Task의 개념은 도입되어있지 않다. 그렇기 때문에 CAD 시스템 상에서 이용 가능한 UI 조작 Task의 기술형식 준비와 구체적인 UI 조작 Task Model 생성 방법의 두 가지가 과제이다. 예를 들면, 휴대전화의 "Dial 통화 기능"을 실현하기 위해서 이용되는 UI 요소(버튼), 그 요소에 대한 손으로부터의 작용(수직방향으로 누른다)과 순번(숫자 버튼을 10회 정도 누르고나서 최후에 통화 버튼을 누른다)과 같은 정보가 필요하다. 이것들이 밀접하게 관련하는 CAD와 그 이외의 Model(Digital Hand Model이나 제품 CAD

Model)과의 친화성을 높이기 위해서는 정보의 통합화가 요구된다. 또 설계 "지원" 시스템이기 위해서는 분산하여 존재하는 정보를 가능한한 자동적으로 취득하여 손입력이 필요한 부분에는 GUI를 준비하는 등 구체적인 조작 Task Model로서 정하기 위하여 입력보조기능을 장착하는 것이 필수이다.

이하 2.1절에서 나타낸 Digital Hand의 각 과제에 대한 도전을 소개하고 최후에 2.2절의 과제에 대한 전망을 기술한다.

3. 손형상의 Variation 생성

"모든 사이즈의" 여러 가지 손 형상을 만들기 위하여, 우선 손형상의 개인차가 어디에 있는지를 조사할 필요가 있다. 일본인 성인남녀 103명의 82항목에 달하는 치수를 버니어캘리퍼스 형상의 인체치수계 등으로 계측하여 인자분석을 한 결과 손형상의 개인차는 두께나 관절폭과 같은 손의 투박함과 손가락의 길이로 나타내는 것을 알았다. 또한, 손으로 다루는 제품에는 남녀구별이 없는 것이 많으므로, 남녀 하나의 군으로 처리를 하고 있다. 이 데이터를 이용하여 Link 치수를 추정하여, 분포의 95%를 커버하는 확률타원상의 8점을 나타내는 가상 Family를 생성한 결과가 그림3이다. 손의 투박함은 같더라도 예를 들면 손가락의 길이가 분포의 대극(對極)에 있는 A와 B로 어느정도 차이가 생기게 되는지 실감할 수 있을 것이다.

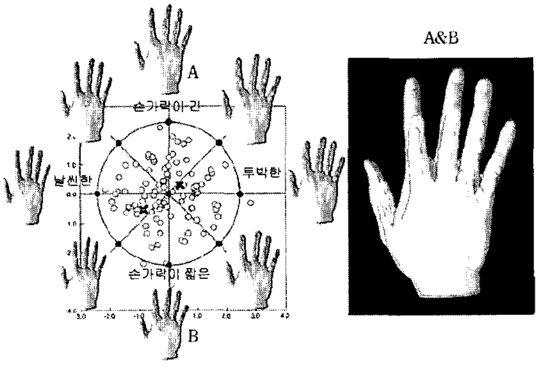


그림 3. 치수분석과 손형상의 Variation.

4. 구조 규명, 운동 계측과 동작 생성

모든 손 사이즈의 모든 동작을 생성하기 위하여, 우선은 다양한 사이즈의 피험자(被驗者) 동작의 계측 · Model화를 한다. 제스처나 무용 등과 달라 "사물을 조작하는 손"의 경우, 사물과 손과의 위치관계를 포함하여 손가락 끝까지 정확하게 계측 · 재구성하는 것이 중요하다. 이것은 각 피험자의 적절한 Link길이의 동정(同定)과 정확한 자세 계측에 의하여 가능해진다.

운동 계측에는 피부표면에 붙인 Marker(그림 4 위의 가운데)의 3차원 위치정보를 얻는 Motion Capture 장치를 이용한다. 그러나 Marker를 붙인 피부의 변형은 크고 복잡하여, 뼈와의 상대관계는 명확하게 밝혀지지 않았다. 그래서 내부의 정보를 관찰하는 것이 가능한 의용화상(醫用畵像)을 사용하여 실제의 관절 구조를 명확하게 하고, 이 해부학적 구조를 고려하여 운

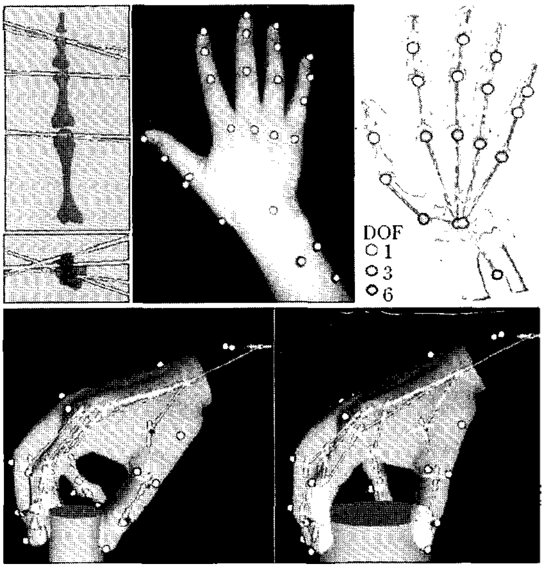


그림 4. 관절각도의 규명과 구조 Model에 기초한 운동계측.

동계측 · 재현기술을 개발한다고 하는 전략을 세웠다.

복수의 다른 자세의 의용화상을 얻어서 각각으로부터 골격표면의 Mesh Model을 추출하여 가까운 위치의 뼈에 대한 먼 위치의 뼈의 상대적인 움직임을 3차원으로 구함으로서, 각관절의 회전축이나 회전중심을 구할 수가 있다. 이것으로부터 손가락의 끝에서부터 보면, 손가락 끝의 두개의 1자유도관절의 회전축은 서로 평행이 아니고, 비틀려져 있는 모습을 알수 있다(그림 4 위의 왼쪽).

각 피험자의 Link 동정에 있어서는 이러한 관절 회전축끼리의 비틀림 관계 등의 해부학적 특징을 고려하여, 부착한 Marker 정보에 의하여 동정가능한지 여부의 점에 주의하여 그림 4위의 오른쪽 구조를 채용하였다. 또 Link 동정을 위하여 Calibration 동작을 피험자가 행할 때에 서로 이웃한 관절의 각도를 고정하는 등 피부 변형의 영향을 억제하기 위한 궁리를 하였다. 이렇게 하여 동정한 Link를 이용함으로서, 손가락 끝의 위치오차 1.5mm 이하로 계측한 손가락 자세를 재현 가능하다(그림 4 아래).

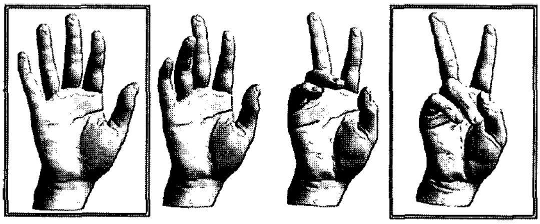
자세생성에는 손이 물체의 어느 곳에 접촉하고, 어떤 관절각도로 잡는가를 구하는 것이 된다. 주어진 물체를 안정하게 파지하기 위한 접촉점의 결정방법에 대한 연구는 다지(多指)Hand Robot의 분야에서 활발하게 이루어지고 있다. 관절각도에 대하여, 多指 Hand의 분야에서는 역운동학으로 푸는 것을 상정하는 것이 많지만, 인간의 손가락은 자유도가 많기 때문에 자연스러운 자세를 갖는 관절각도를 역운동학으로 구하는데는 깊이 고려할 필요가 있다. CG의 분야에서는 역운동학에 의하여 구한 관절각도를 운동 데이터 베이스를 이용하여 자연스러운 자세에 가까워지도록 수정하는 수법을 제안하고 있지만, 파지위치는 먼저 주어지는 것이 전제가 되고 있다.

Digital Hand 에서는 새로운 물체에 대하여 가능한 동작을 추정할 필요가 있다. 인간의 파지 계측으로 얻어진 파지점 정보를 기초로 하여, 거의 동질의 파지 상태가 성립하는 파지점의 집합을 생성하는 수법 등을 채용하면서 두 가지 Approach의 조합에 의한 자세 생성 수법의 확립을 지향하고 있다.

5. 운동 할때의 표면형상 합성

손의 자세가 변함에 따라 손표면의 형상이 어떻게 변형하는가에 대한 상세 Model화는 간섭 Check 등 손과 제품의 접촉상태를 고려하는 것이 중요하고 Realistic 한 CG도 가능해진다.

표면형상의 Model화에 있어서 과제의 하나는 밖에서 카메라 등으로 촬영한 것에는 가려져서 관측할 수 없는 손바닥 안쪽의 상세한 형상을 어떻게 얻을 것인가 이다. 이것에 대하여 Link 구조의 규명에서도 이용한 의용화상은, 계측시간의 문제로부터 Real Time에서의 대량 관측에는 적합하지 않지만, 손바닥 쪽의 상세한 형상을 가리지 않고 얻을 수가 있다. 또, 상세한 표면 형상과 동시에 골격의 정보가 얻어지는 이점도 있다. 그래서 몇가지 자세의 CT화상을 계측하여 표면 형상을 추출하고, 그들의 보간에 의하여 임의의 중간 자세에 있어서 형상의 합성을 하는 작전으로 하였다. 우선 3장의 구조규명할 때와 마찬가지 요령으로, 정확한 Link 구조와 그 자세를 구하였다. 또 보간을 위해서는 여러 가지 자세의 형상 데이터가 모두 同相構造의 Mesh로 표현될 필요가 있다. 이것에 대해서는 표준 자세에서의 표면 Mesh Model을 다른 자세의 계측 데이터에 Feedback 시킴으로서 구하였다. 이것들에 의



□ 는 계측 데이터, 그 외는 합성

그림 5. 운동을 수반하는 형상변형 합성.

하여 계측한 형상의 보간으로 자세에 대응하는 표면 형상의 합성이 가능해졌다(그림 5).

6. 감각과 평가

파지나 버튼의 물리적 조작성을 근사적, 간이적으로 나타내는 지표로는 각 관절에서 발생하는 Torque의 낮음이나 손가락 끝에서의 조작가능성의 높음, 그 관절각도에서 수동저항의 낮음 등을 들 수가 있다. 이것들은 Digital Hand의 자세 · 기구나 반력 등으로부터 계산가능하여 피험자 실험을 수반하지 않고 예측된 손의 자세 등으로부터 물리적 조작성을 가상평가할 수 있다고 생각하고 있다.

실제의 인체에는 물체와의 접촉에 의하여 인체연부조직(人體軟部組織)이 변형하여 생체내에 응력변화가 일어난다. 그 응력변화를 생체내의 감각기가 수용하여, 이것을 뇌에서 지각 · 평가하고 있다. 이들의 감각정보 전달의 Mechanism을 규명할 수 있으면, 위에서 들었던 근사적 · 간이적인 지표 보다도 실제의 인간평가 구조에 가까운 가상 평가를 실현할 수 있을 것이다. DHRC에서는 이러한 접촉정보전달의 Model화를 지향하여 접촉에 의한 물리적변형과 감각과를 대응시키는 연구를 진행하고 있다.

손가락 끝의 터치 동작으로는 손가락 끝과 물체가 스칠 때에 주변 부분은 가장 빨리 항복(降伏)하여 스치기 시작하여, 중앙부분은 최후까지 고착되어 있다. 지금까지의 연구로부터 미끄러짐 영역과 고착영역과의 관계가 인간이 느끼는 「미끄럼 감각」과 관계하는 것을 알고 있어서, 손가락 끝의 변형과 미끄럼을 계측하여 Model화 함으로서 「미끄럼 감각」의 추정이 가능하다고 생각하고 있다.

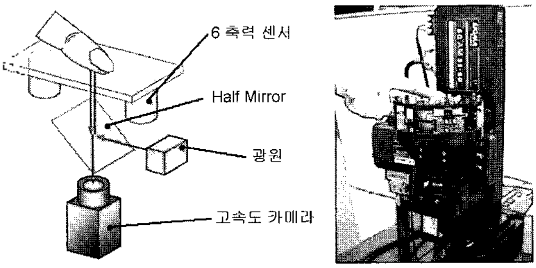


그림 6. 손가락 끝 변형 계측장치.

우선, 손가락 끝의 변형과 미끄럼을 계측하는 장치를 개발하였다. 장치는 손가락 끝 접촉면의 지문변형을 촬영하기 위한 고속도 카메라, 손가락 끝 접촉력을 계측하기 위한 6축력 센서, 임의의 손가락 끝 접촉상태를 재현하기 위한 고정도 3축 Linear Stage로 구성되어 있다(그림 6). 고정된 손가락에 대하여 Stage가 임의의 속도로 이동하여, 그 때의 지문 변형을 카메라로 찍음과 동시에 손가락과 Stage가 스칠 때, 가장 빨리 항복하여 스치기 시작하는 주변 부분과 최후까지 고착되어 있는 중앙부분과의 관계를 시계열적으로 정량화 할 수 있다.

이 손가락 끝 변형을 유한요소 Model로 Simulation 하는 연구도 진행되고 있다. 피하조직을 3개의 층으로 나누어 각각을 초탄성체로 Model화 하였다. 피하조직의 변형을 MR 화상 계측에 의하여 계측하여, 그 때의 변형 외력을 MR 장치내에서 사용할 수 있는 독자개발한 Load Cell로 계측한다. 유한요소순 해석의 反復收束 계산에 의하여 실측한 변형과 외력을 만족하는 Model의 영율을 동정하는 기술을 개발하고 있다. 이것에 의하여 임의의 물리자극에 대한 변형이 추정가능해진다.

7. 3차원 CAD에 UI조작 Task도입

2장에서 기술한대로, UI 조작 Task를 CAD 상에서 기술하는데는 CAD 상에서의 다른 Model(Digital Hand Model 이나 제품 CAD Model)과의 정보통합화가 요구된다.

UI 요소를 Sequential하게 작동시킴으로서 UI 조작 Task가 실행된다. 또 같은 UI 요소에 Digital Hand가 작용하여도, 작용시의 상태가 다르면 실행되는 기능이 달라진다. 그렇기 때문에 UI 조작 Task는 표준적인 UML의 State Chart나 Sequence圖로 기술하기로 한다.

그림 7에 Ergodesign 지원시스템에 있어서 각 Model과 평가 Process의 관계를 나타낸다. 조작 Task Model이 부여하는 모든 조작계열에 대응하는 Digital Hand Model의 동작계열을 자동생성하여, 각각 손가락 구조의 관점에서 용이성을 평가하게 된다.

8. 결 론

CAD는 설계과정의 假想化에 의하여 제작의 효율을 올리는 것을 목적으로 하여 테어나 PLM 등 보다 많은 정보를 도입함으로서, 보다 효율을 올리기 위하여 발전을 달성하여 왔다. 이번회의 Project는 그 CAD에 "사람"이라고 하는 요소를 부가함으로서 제품과 사람을 포함한 시스템 전체의 설계 품질 개선과 그 효율화를 지향하는 시도이다. 이 흐름이 향후 더욱 발전한 것은 틀림이 없다. 이번회 UI 조작 Task의 도입으로 손에 의한 작용이 부가된 것과 같이, CAD의 앞으로의 발전과정에서 사람에 의한 조작을 고려한 시스템을 만드는 것이, Digital Human Model과 3차원 CAD 어느 분야에도 유익할 것이다.

◎◎◎◎

일본정밀공학회지, Vol.71, No.4, 2005

본 기사는 건국대학교의 이성수 편집위원이 "일본정밀공학회지" 2005년 4월호 pp.431-434를 번역한 것으로 일본정밀공학회지의 연락처는 다음과 같다.

주소 : 우 102-0073 東京都千代田區 九段 北 1-5-9(九段誠和 Building 2F)
TEL : +81-3-5226-5191
FAX : +81-3-5226-5192
URL : http://www.jspe.or.jp/

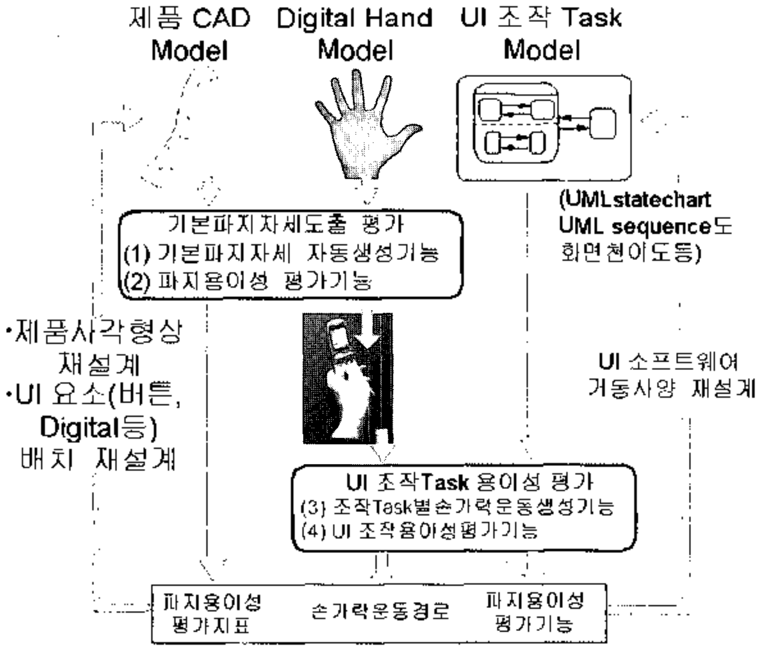


그림 7. Digital Hand와 3차원 CAD Model을 융합한 가상 Ergonomics평가 시스템의 기능.