

대한기계학회 주선

제10회 전국학생설계경진대회(2020년)

설계 최종 보고서

참가부	대학부				
참가분야	공모주제 (○) / 자유주제 ()				
참가팀명	NSCL				
설계제목	와이어 Mechanism을 이용한 식사 보조 로봇				
지도교수/교사	(소속)서울과학기술대학교 (성명)이치범 (이메일)chibum@seoultech.ac.kr				
대표자 (신청인)	성명	소속	연락처 (휴대폰)	E-mail	주소
	이현진	서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과			

참가팀원 인적사항

NO	성명	소속 / 학년	E-MAIL
1	이현진	서울과학기술대 기계시스템디자인공학과 / 4학년	ytn5262@naver.com
2	박성진	서울과학기술대 기계시스템디자인공학과 / 4학년	8639sung@gmail.com
3	이석준	서울과학기술대 기계시스템디자인공학과 / 4학년	najun96@naver.com
4	이용범	서울과학기술대 기계시스템디자인공학과 / 4학년	ehxhfl005@naver.com

설계 요약문

참가분야	공모주제 (○) / 자유주제 ()
참가팀명	NSCL
설계제목	와이어 메커니즘을 적용한 식사보조로봇
대표자명	이현진
요약문	최근 한국사회는 급격한 고령화 시대에 접어들었다. 이에 따라 노인인구에 대한 복지인력의 수요가 늘고 있으며, 스스로 식사를 할 수 없는 사람들을 도와주는 로봇인 식사보조로봇을 개발함으로써 복지인력이 복지인력들의 업무 중 하나인 식사보조업무에 대한 수고를 덜고 전체적인 복지의 질 또한 향상시키려 한다. 시중에 나와있는 제품의 선행조사 결과 안전성과 편의성에 각각 문제가 있었고, 이를 보완한 식사보조로봇의 개발이 본 설계의 목적이다. 기존 매니퓰레이터 형태의 식사보조로봇의 안전성 문제의 경우 기구의 질량 및 관성을 줄일 수 있고, 역 구동성을 가지게 하는 와이어 메커니즘을 적용하여 보완하였다. 또한 와이어 메커니즘의 사용에 기인하는 복잡한 기구부를 제어할 수 있는 역기구학 및 궤적생성 알고리즘을 개발하여, 기존의 식사보조로봇처럼 사람이 궤적을 지정 해 주지 않아도 음식을 가져다줄 수 있도록 하였다. 편의성 문제의 경우 깊이 카메라(depth camera)를 이용하여 사람의 입을 찾고 입 벌림을 인식하여 입을 ‘아~’ 하고 벌릴 때 음식을 가져다줄 수 있게 하여 마치 사람이 벌어진 입을보고 음식을 가져다 주는듯한 기능을 구현하였다. 이러한 식사보조로봇의 개발을 통해 매 끼니마다 힘들게 식사하시는 분들이 조금이나마 편해지고 그들을 보조하는 복지인력의 수고를 덜 수 있게 되길 바란다.
설계프로젝트의 입상 이력	

와이어메커니즘을 적용한 식사보조로봇

이현진* · 이용범* · 박성진* · 이석준* · 이치범†

*서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Wire Driven Meal Assistance Robot

Hyunjin Lee*, Yongbeom Lee*, Sungjin Park*, Seokjun Lee* and Chibum Lee†

* Seoul National University Of Science And Technology

(Received January 1, 2013 ; Revised January 2, 2013 ; Accepted January 3, 2013)

Key Words: wire mechanism(와이어 메커니즘), Human-Robot interaction(인간-로봇 상호작용), Flexible multibody dynamics(유연 다물체 동역학), Structural analysis(구조 해석), Modeling and simulation(모델링 및 시뮬레이션), robot control(로봇제어), computer vision(컴퓨터 비전)

초록: 본 설계의 목적은 기존의 식사보조로봇보다 사용하기에 안전하고 편의성 또한 증가시킨 식사보조 로봇의 개발이다. 설계한 로봇은 음식을 사람에게 먹이기 위해 설계된 5자유도의 매니퓰레이터(manipulator)이다. 낮은 관성과 역구동성을 가질 수 있게 하는 와이어 메커니즘을 적용하여 사용자에게 대한 안전성을 높이고 모터와 모터 드라이버의 필요성능을 낮추었다. 복잡한 와이어 메커니즘 설계의 시간과 비용을 줄이기 위해 동역학 해석을 진행하여 와이어 구동 방식에 대한 해석을 진행하였다. 또한 기구부 제어에 영상처리 알고리즘과 궤적 생성의 적용을 통해 사용자의 편의성 또한 증가시켰다.

Abstract: The purpose of this design is to develop a meal assistant robot that is more safer and convenient. The designed robot is a 5 degree of freedom manipulator designed to feed food to humans. By applying a wire mechanism that make robot has low inertia and back-drivability, safety for users is increased and the expected performance of motors and motor drivers is decreased. To reduce the time and cost of the design of this mechanism, analysis of the mechanism was conducted. In addition, user convenience has also been increased through image processing algorithms and trajectory generation in the control of the mechanism.

1. 서 론

전 세계적으로 고령 인구 및 장애 인구가 증가하고 있으며, 이들을 위한 복지 인력의 수요 또한 증가하고 있다. 복지 인력이 맡은 업무 중 식사 보조 업무는 지속해서 발생하며 꼭 필요한 반복적인 단순 노동으로, 식사 보조 업무를 해결해 주는 로봇이 보편화 되면 복지 인력의 수고를 덜어 줄 뿐 아니라, 식사 보조에 필요한 인력이 다른 업무를 할 수 있도록 하여 전반적인 복지의 질 또한 늘어날 것으로 전망된다. 식사보조로봇이란, 스스로 식사가 어려운 분들의 식사를 보조해 주는 로봇으로서, 이미 시장에 여러 형태의 식사보조로봇이 존재하지만, 각각의 장단점을 고려하여 더욱 안전하고, 사용자에게 대한 편의성이 고려된 식사보조로봇의 설계를 진행하였다.

설계에 앞서 기존 식사보조로봇에 대한 선행조사를 진행하였으며, 시장에 나와 있는 식사보조로봇의 경우 4 자유도를 사용한 meal buddy robot과, 6자유도를 가지는 매니퓰레이터를 사용하는 obi 등등을 조사하였으며, 각각의 장단점이 존재했다. meal buddy robot의 경우 자유도를 적게 사용함에 따라 소비하

† Corresponding Author, chibum@seoultech.ac.kr

© 2020 The Korean Society of Mechanical Engineers

는 공간이 크고, 동작 또한 부자연스러운 문제가 있었으며, obi의 경우 자유도가 높아 소비하는 공간은 작지만, 기구 부의 우수성에 반하여 자체적인 지능적인 시스템의 부재로 인해 사용자가 수저의 궤적을 사용자가 설정해야 하고 버튼을 눌러 음식을 골라 섭취하는 방식을 사용하여, 편의성이 부족한 문제가 존재했다. 또한, 두 제품 모두 로봇팔에 구동부가 포함되어있는 일반적인 매니플레이터의 구조 즉, 동력부가 조인트에 붙어있어 관성이 크고 동시에 역구동성의 부재로 안전성의 문제가 있음을 확인할 수 있었다.

이러한 기존 식사보조로봇의 안전성 및 편의성의 문제를 와이어 매커니즘을 적용한 5 자유도 매니플레이터 형태의 기구부와, 기구의 특성을 고려한 경로계획(trjectory planning), 및 영상처리 알고리즘 기반으로 사용자의 의도 파악 기능이 있는 소프트웨어를 통해 보완한 식사보조로봇을 개발하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 설계문제의 정의

서론에서 언급했다시피, 기존 제품에는 편의성과 안전성에 대한 문제가 있었다. 이를 우리는 안전성의 경우 질량과 관성을 줄이고 역구동성을 가지게 하는 설계를 통해, 편의성의 경우 영상처리 알고리즘을 적용한 제어를 통해 보완하였다. 와이어메커니즘⁽¹⁾을 올바르게 적용할 경우, 와이어를 통하여 각 조인트부에 동력을 전달함으로써, 동력부를 각 조인트마다 배치하는 것이 아닌 매니플레이터의 아랫부분에 배치함으로써, 기구부의 전체적인 관성 및 질량을 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라 모터와 모터드라이버의 기대성능 또한 크게 낮춰 경제적인 이점까지 가질 수 있다. 하지만 동력을 와이어를 통해 간접적으로 전달하는 방식은 와이어의 마찰과 간섭 변형 등 여러 요인에 기인하는 문제에 부딪혔으며, 설계할 때에 생겼던 문제들을 MSC. Adams를 기반으로 한 와이어메커니즘의 해석 및 시행착오를 기반으로 문제를 해결방법을 각 조인트의 설계를 주 관점으로 아래에 서술하였다. 또한, 각 조인트를 설계하는 과정에서 일반적인 1자유도 회전 조인트가 아닌 원과 원이 맞닿는 구조의 1자유도의 조인트, 구와 구가 서로 맞닿는 구조의 2자유도 조인트를 사용하였으며, 이러한 조인트의 경우 일반적인 매니플레이터와 같은 기구학을 사용해서는 정확한 해석이 불가능 하였다. 따라서 이러한 복잡한 기구부를 해석하며, 음식을 흘리지 않고 정확히 사용자에게 가져다주는 경로계획 방법이 필요하였으며, 이를 해결한 방법도 아래에 서술하였다. 마지막으로 사용자의 편의성을 위해 사용자의 입벌림 인식 및 입의 위치 추정방법 또한 아래에 서술하였다.

2.2 기구부 설계

실제 매니플레이터의 제작은 조인트 각각의 역할에 따라 팔꿈치 조인트, 손목 조인트, 어깨역할을 하는 베이스 세 부분으로 나누어 진행되었으며, 팔꿈치 조인트, 손목 조인트 부분은 일반적인 매니플레이터와 달리 와이어 메커니즘을 사용하였기 때문에 많은 시행착오가 예상되어 MSC. Adams로 해석⁽²⁾을 진행한 뒤 설계를 진행하였다.

2.2.1 팔꿈치 조인트 해석

팔꿈치 조인트의 경우 매니플레이터가 사람의 팔과 같은 구동 범위를 가져서 움직임을 쉽게 예측할 수 있도록 설계를 진행하였다.

또한, 최종적인 매니플레이터의 가반하중(payload) 1~2 kg를 목표로 MSC. Adams 해석을 실제와 유사한 조건을 주기 위하여, 조인트에 17.45 N-mm/s/deg의 감쇠를 추가하였으며 강성은 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 또한, 여러 번 감긴 와이어는 와이어의 밀도와 직경을 조절하는 것으로 대체하였다.

Fig. 1(a)는 MSC Adams에서 구현한 매니플레이터이다. 조인트가 최대가동범위에서 동작하였을 때 와이어에 가해지는 최대 장력은 Fig. 1(b)에서 약 170 N임을 확인하였다.

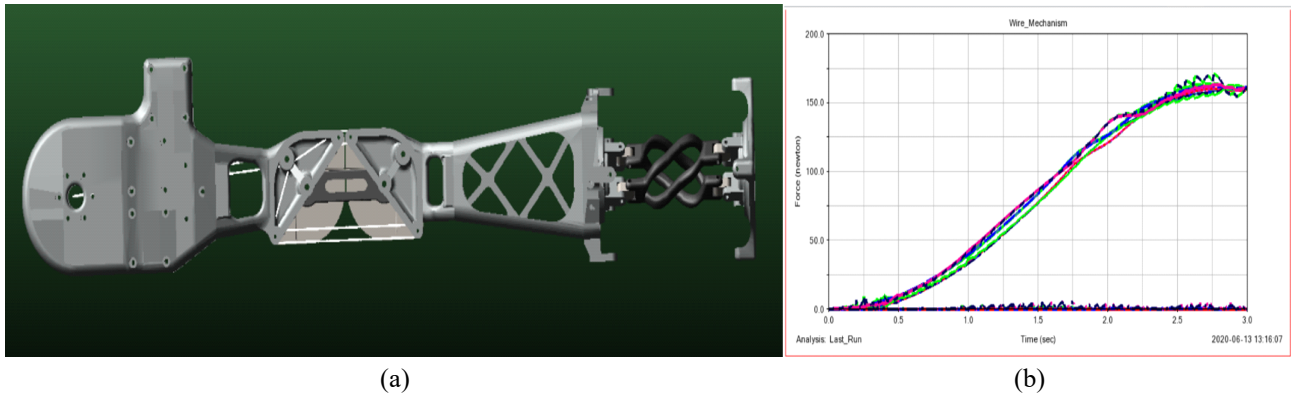


Fig. 1 Simulation of wire mechanism by MSC. Adams: (a) manipulator modeling; (b) Simulation result of required force

2.2.2 팔꿈치 조인트 설계

팔꿈치 조인트 구동 시 조인트의 미끄러짐이 발생하였고 이는 강성 저하로 이어질 수 있다. 이를 막기 위해서 기어의 역할을 하는 두 개의 와이어를 추가하였다.

두 개의 와이어는 서로 당겨주게 되어 구동 시에도 서로 지탱하며 마치 기어가 맞물리는 역할을 하게 되어, 추가적인 강성 또한 보완된다. Fig. 2(b)는 기어의 기능을 하게 만들어주는 와이어의 모습이다. 해당 와이어를 통해서 미끄러짐을 방지하고 두 맞물리는 조인트가 같은 각도만큼 움직일 수 있도록 해준다.



Fig. 2 Detailed design of elbow joint: (a) wire pulley and wire connection for elbow part; (b) elbow design with wire mechanism

2.2.3 손목 조인트 해석

손목 조인트는 사용자의 입에 더 가깝게 갈 수 있도록 두 축을 독립적으로 회전할 수 있는 조인트를 목표로 하였다. 일반적인 유니버설 조인트의 구조를 사용하려고 하였으나, 일반적인 유니버설 조인트를 와이어로 구동하게 되면 와이어의 길이가 변화하여 강성을 줄이거나 과도한 장력이 가해져 역구동성을 저하하는 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 쿼터니언 조인트⁽³⁾(quaternion joint) 개념을 사용하여 제작하였다.

쿼터니언 조인트 경우 구조적인 특성에 의한 반경을 수식을 세우고, 이를 시뮬레이션으로 검증하였다. Fig. 3는 계산을 위해 간략화한 모습이다. Fig. 3 (b)에서, 조인트의 반경이 각 요소의 길이에 따라서, 회전반경이 변화하는 것을 수식 (1)을 통해서 확인할 수 있다. 이를 통하여 다음 수식 (2), (3)으로 반경의 함수를 구한다.

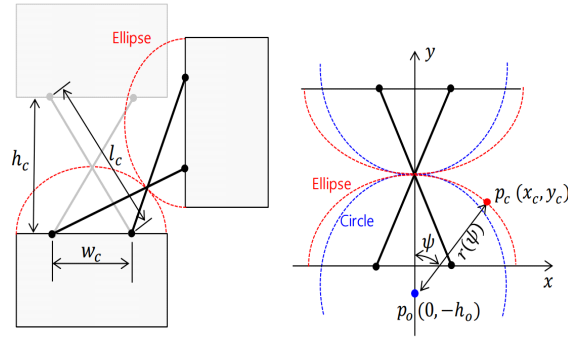


Fig. 3 Basic model of wrist joint

(Kim Yong Jae, "quaternion joint": Dexterous 3-DOF j Representing quaternion Motion for High-Speed Safe Interaction")

$$\frac{x_c^2}{(l_c/2)^2} + \frac{y_c^2}{(h_c/2)^2} = 2 \quad (1)$$

$$y_c = \frac{1}{\tan \varphi} x_c - h_0, r = x_c / \sin \varphi \quad (2)$$

$$r(\varphi) = \frac{h_0 + \sqrt{h_0^2 + (1 + (\frac{w_c}{h_c})^2 \tan^2 \varphi)((\frac{w_c}{2})^2 - h_0^2)}}{\cos \varphi (1 + (\frac{w_c}{h_c})^2 \tan^2 \varphi)} \quad (3)$$

설계한 조인트의 각도에 따른 반경의 변화를 실험 결과 Fig. 4를 통해 나타냈다. 길이의 변화는 최대 0.35 mm로 구동에 무리가 큰 무리가 없다고 판단하였다. 또한, 이를 MSC. Adams를 통해서도 확인했다. 손목 조인트가 구동할 때 한 쌍을 이루는 와이어의 길이를 측정하였으며, Fig. 5 길이의 변화가 가장 많이 발생하는 최대가동범위로 구동하였을 때를 기준으로 오차율을 계산하였다. 초기 위치에서의 길이 209.728 mm에서 해당 위치에서 211.134 mm로 변화를 확인했다. 최대 길이 변화는 약 1.406 mm로 1% 미만의 오차로 무시할 수 있다고 판단하였으며, MATLAB에서의 결과와 마찬가지로의 결과를 확인했다. 이를 통해서 해당 조인트의 반경이 원의 모션으로 근사화할 정도로 변화가 작다고 할 수 있다.

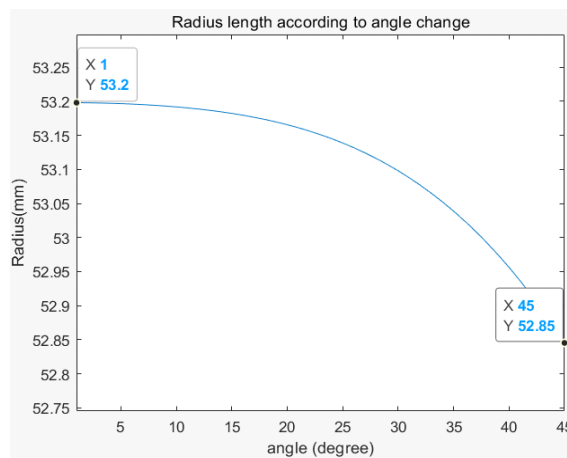


Fig. 4 Length of radius depend on joint angle

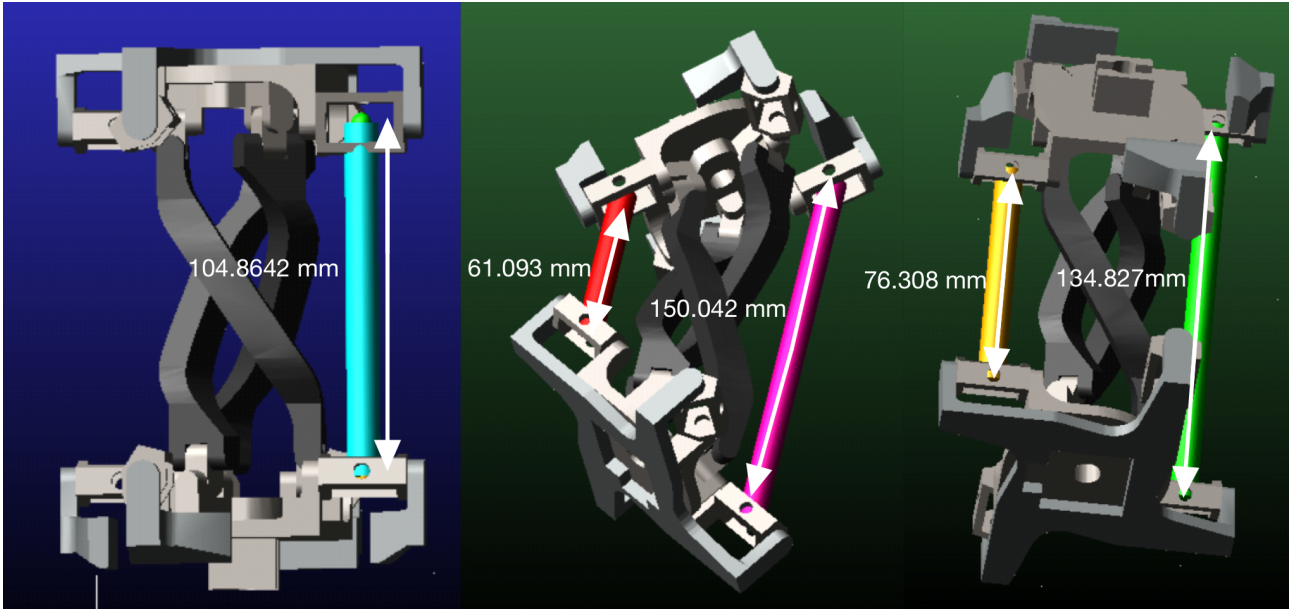


Fig. 5 Length of wire according to position

2.2.4 손목 조인트 설계

쿼터니언 조인트의 특성상 와이어가 대칭적으로 같은 양만큼 변화하지 않으면 와이어의 역구동성을 해칠 우려가 있어 반드시 대칭적으로 움직여야 한다. 다시 말해서, 각 요소의 길이에 따라 동작 궤도가 변화하여 와이어에 걸리는 장력이 변화해 역구동성을 해칠 우려가 있어서 최대한 MSC. Adams 검증 내용을 바탕으로 원에 근사하도록 각 부분의 길이를 조절하여 설계에 적용했다.

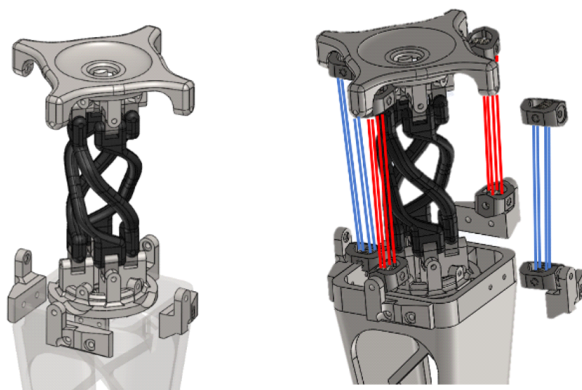


Fig. 6 wrists design with quaternion joint

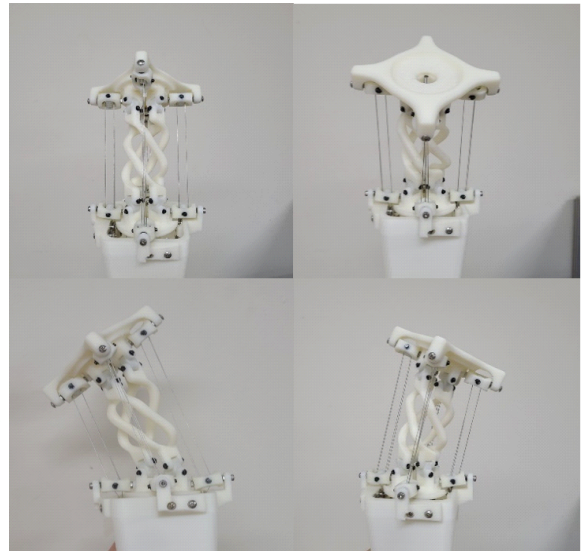


Fig. 7 Implemented wrists joint

2.2.5 베이스 설계

베이스 부분의 경우 매니퓰레이터의 전체적인 하중 부담이 제일 심해지는 곳이기 때문에 최대한 견고하게 제작했다. 더불어 전체적인 모터 부분이 전부 가까이 있도록 구성하여 약간의 중력보상 효과를 가져오도록 설계되었다.

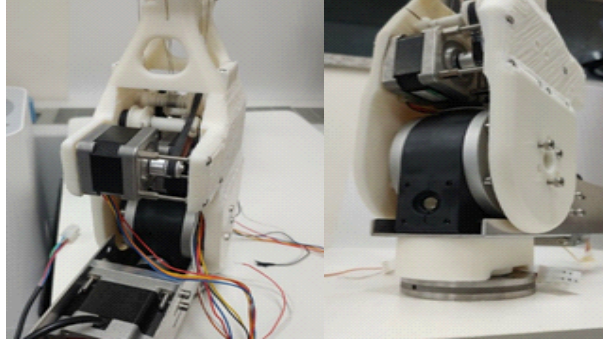


Fig. 8 Detailed design of base

2.2.6 와이어 강성설계

와이어를 별도의 강설설계 없이 사용하면, 구동 중 와이어의 탄성에 의하여 와이어의 길이 변화가 일어날 수 있다. 그렇게 되면, 기구부의 강성을 감소시켜 오히려 매니퓰레이터의 안전성을 떨어뜨릴 우려가 있다. 이를 개선하기 위해서 강성설계⁽²⁾를 기반으로, 와이어를 여러 차례 감아 병렬연결 효과로 강성을 증가시키는 방안을 사용하였다.

매니퓰레이터의 제작에 사용되는 와이어는 직경 0.3mm의 철제 와이어이며 약 15 Lbs(6.8 Kg)의 하중을 견딘다. 매니퓰레이터가 최대한 펼쳐진 상태에서 1~2kg의 가반하중을 가정하여 와이어에 걸리는 하중을 계산하면 150N이 나오며, 추가로 주어진 임무를 수행하게 되면 견뎌야하는 중량과 더불어 마찰이 발생하므로 이보다 높은 하중을 견디도록 설계되어야 한다. 이를 위해서 수식 (4)을 이용, 두 번(n=2) 이상 감아 사용하면 충분할 것으로 판단하였으며, 이를 토대로 강성을 강화하기 위하여 2회 이상 와이어를 감았다.

$$K_{out} = \frac{T_{out}}{\Delta x_{in}} = \frac{n T_{in}}{\Delta x_{in}} = n^2 K \quad (4)$$

2.3 기구학 및 경로계획

본 기구의 조인트에 적용된 기구적 메커니즘은, 와이어를 사용했을 뿐 아니라, 원과 원이 맞닿은 구조와 구와 구가 맞닿은 구조를 사용하여, 모터의 회전각도와 조인트의 회전 각도가 일반적인 감속기와 모터로 이뤄진 조인트와 같이 비례관계가 아닌 복잡한 수식으로 얹혀있다. 이러한 기구부를 해석하고 제어하기 위한 정기구학, 역기구학, 경로계획 및 이를 검증한 시뮬레이션 방법을 아래에 서술했다.

2.2.1 정 기구학

역기구학 풀이나 경로계획을 위해서는 우선 적으로 매니퓰레이터의 정 기구학의 풀이가 필수적이며, 이를 위한 DH-parameter 들이 Table. 1 에 나타나 있다. DH-parameter로 각 기구부를 완전히 표현하지 못한 이유는 와이어 메커니즘이 적용된 팔꿈치 조인트와 손목 조인트가 DH-parameter로는 표현할 수 없는 움직임을 보이기 때문이다.

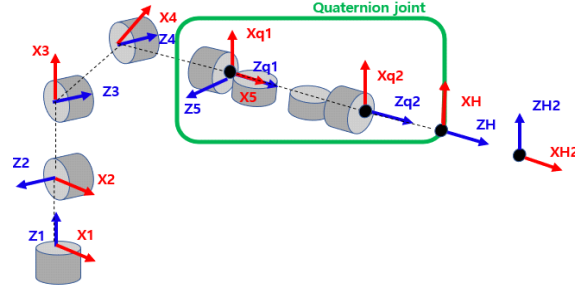


Fig. 9 concept of kinematics

i	θ_4	d	a	α
$1 \rightarrow 2$	θ_1	d_1	0	$\pi/2$
$2 \rightarrow 3$	θ_2	0	a_2	π
$3 \rightarrow 4$	θ_3	0	a_3	0
$4 \rightarrow 5$	θ_3	0	a_4	π
$5 \rightarrow q_1$	$R_y(\pi/2)R_z(\pi/2)$			
$q_1 \rightarrow q_2$	$R_z(\theta_4)R_y(\theta_5/2)T_z(H)R_y(\theta_5/2)R_z(-\theta_4)$			
$q_1 \rightarrow H$	0	d_7	0	0
$H \rightarrow H_2$	$R_y(\pi/2)R_z(\pi)$			

Table 1 DH-parameter

팔꿈치 조인트는 같은 크기의 두 기어가 맞물리는 듯한 움직임을 보인다. 즉 서로 방향이 반대이고 같은 각도만큼 움직이는 두 개의 revolute 조인트가 붙어있는 구조라고 볼 수 있다. 즉, Table. 1에 θ_3 이 2번 나오는 이유가 이 팔꿈치 조인트를 표현하기 위한 것이다. 손목 조인트의 경우 쿼터니언 조인트를 사용하였고, 조인트의 움직임을 두 개의 회전변수로 나타내기 위해, 수식 (5)와 같이 표현하였다.

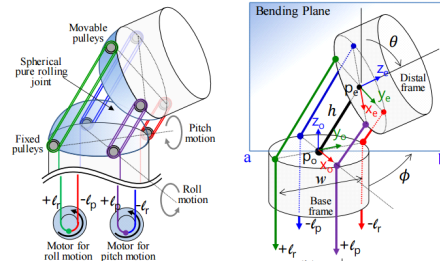


Fig. 10 composition method of quaternion joint

(Kim Yong Jae, "quaternion joint": Dexterous 3-DOF joint Representing quaternion Motion for High-Speed Safe Interaction")

$$\begin{aligned}
 {}^oT_e &= R_z(\phi)R_y\left(\frac{\theta}{2}\right)T_z(h)R_y\left(\frac{\theta}{2}\right)R_z(-\phi) \\
 &= \begin{bmatrix} 1 - 2C^2(\phi)S^2\left(\frac{\theta}{2}\right) & -2S(2\phi)S^2\left(\frac{\theta}{2}\right) & C(\phi)S(\theta) & hC(\phi)S\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -2S(2\phi)S^2\left(\frac{\theta}{2}\right) & 1 - 2S^2(\phi)S^2\left(\frac{\theta}{2}\right) & S(\phi)S(\theta) & hS(\phi)S\left(\frac{\theta}{2}\right) \\ -cC(\phi)S(\theta) & -S(\phi)S(\theta) & C(\theta) & hC(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

2.2.2 역 기구학

원하는 엔드이펙터(end effector)의 위치에 해당하는 각 조인트의 각 변위를 구하는 과정인 역기구학⁽⁵⁾은 매니플레이터 제어에 필수적이며, 따라서 각종 구속조건(수저가 지표면에 평행)을 적용하여 수치 해를 구했다.

Fig. 을 살펴보면 수저가 지표면과 평행하기 위해서는 최종적인 엔드이펙터의 회전형렬 부분이 yaw의 회전처럼 구성된다. 이를 위한 조건식을 살펴보면 $\theta_4 = -\pi/2, \pi/2$ 일 때, 수식 (6) 부분을 만족하거나, $\theta_4 = 0$ 일 때, 수식 (7) 부분을 만족하게 된다면 수저는 지표면과 평행을 이루고 있다. 이중 우리는 수저가 입 쪽에 더 가까이 갈 수 있도록 yaw 축 회전 요인이 두 개 존재하는 수식 (6)의 조건을 살펴본다.

$$\theta_2 - 2\theta_3 = 0 \quad (6)$$

$$\theta_2 - 2\theta_3 + 2\theta_5 = 0 \quad (7)$$

Fig. 11 엔드이펙터가 지표면과 평행하게 있다면 수식 (6)과 수식 (8)을 만족하게 된다. 이 두 개의 수식을 연립하면 수식 (9)를 구할 수 있고 이를 해석적으로 해를 구하면 θ_3 를 구할 수 있다. 후에 수식 (6)을 통하여 θ_2 를 구할 수 있다.

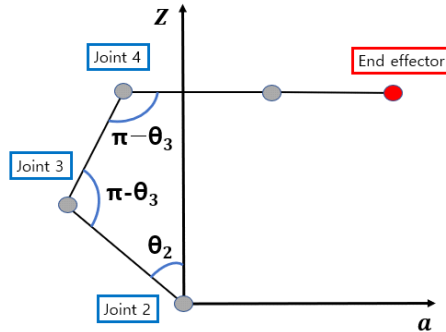


Fig. 11 solve θ_2, θ_3

$$a_2 \sin(\theta_2) + a_3 \sin(\theta_2 - \theta_3) = Z \quad (8)$$

$$-a_2 \sin(2\theta_3) - a_3 \sin(\theta_3) + Z = 0 \quad (9)$$

매니플레이터 yaw의 회전은 수식 (6) 조건에서 θ_1, θ_5 의 회전만으로 나타나게 된다. 이를 표현하면 수식 (10)과 같다. z축의 회전을 따로 살펴보기 위해서 xy 평면에 정사영을 내리게 되면 Fig. 12과 같다. Fig. 12과 수식 (11), 통하여 수식 (12)이 성립함을 알 수 있고 이를 이용하여 θ_5 를 구할 수 있다. 또한 수식 (10)을 통하여 θ_1 을 구할 수 있으며, 앞서서 $\theta_4 = -\pi/2$ 의 조건을 가지고 있다고 가정했으므로, $\theta_1 \sim \theta_5$ 값을 모두 구하였다.

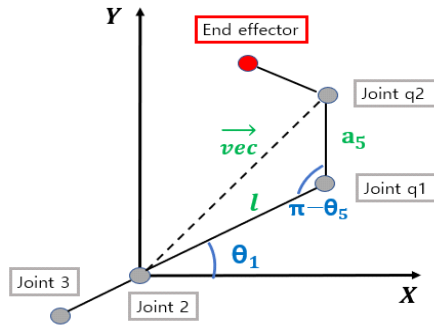


Fig. 12 Kinematic diagram for solving θ_1, θ_5

$$\theta_1 + 2\theta_5 = YAW \quad (10)$$

$$a_2 \cos(\theta_2) + a_3 \cos(\theta_2 - \theta_3) + a_4 = l \quad (11)$$

$$a \sin\left(\frac{l^2 - a_5^2 + ve^2}{2ve \cdot l}\right) + a \sin\left(\frac{-l^2 + a_5^2 + ve^2}{2ve \cdot a_5}\right) = \pi - \theta_5 \quad (12)$$

2.2.3 경로계획

제작한 매니퓰레이터의 경우 다음 세가지 동작을 수행할 수 있어야 한다.

1. 수저를 그릇까지 가져가는 동작
2. 수저로 음식물을 뜨는 동작
3. 수저를 지표면과 평행하게 유지하면서 입 위치로 가져가는 동작.

이중 첫 번째 경우엔 역기구학을 토대로 중간과정의 고려 없이 현재 엔드이펙터의 위치와 목표하는 엔드이펙터의 위치만 알 수 있다면 그 값을 토대로 모터를 움직여 수행할 수 있으나, 나머지 두 동작의 경우엔 중간 수저 경로에 대한 고려가 필수적이다.

두 번째 경우 수저를 통해 음식을 뜨는 동작은 Fig. 13과 같이 depth camera와 Fig. 13 과 같은 ar tag의 위치 및 방위를 추정할 수 있는 오픈소스 기반의 라이브러리인 ar track alvar⁽⁷⁾를 통한 ar tag가 그려진 정육면체형태의 물체[Fig. 14]의 위치 및 방위 추정[Fig. 15]을 통해 실제 사람이 음식을 푸는 동작을 분석하여 엔드이펙터의 경로를 설정한다.

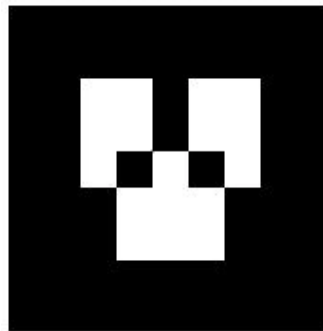


Fig. 13 Ar tag



Fig 14 Ar-tag printed cube

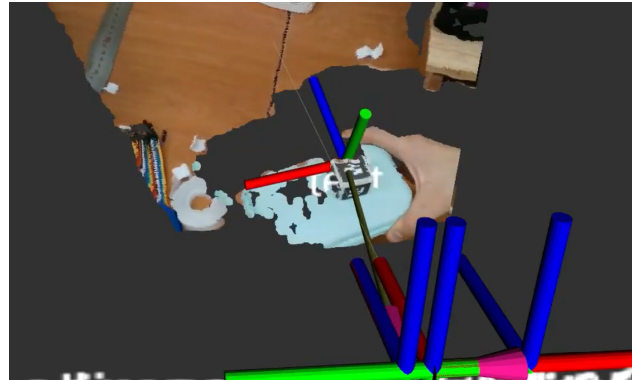


Fig. 15 Pose estimation from depth image

3번 동작의 경우 엔드이펙터가 지표면과 평행하게 움직일 수 있는 경로를 찾기 위해 θ_4 가 $-\pi/2$ 혹은 $\pi/2$ 인 경우와 $\theta_4=0$ 인 두 경우로 나누어서 경로계획을 진행했다. 평행을 유지하면서 θ_4 의 값 변화를 위해서는 $\theta_5=0$ 으로 변화시켜야 할 필요가 있다. 이를 해결하기 위해 다음 두 과정을 통해 경로계획을 적용했다.

step 1) $\theta_4=0$ 과 수식 (7)

이 경우 θ_5 가 0이 될 때까지의 감소량만큼 θ_3 도 감소시킨다. 후에 θ_4 가 $\pm\pi/2$ 되도록 변화시킨다.

step 2) $\theta_4= -\pi/2$ 또는 $\pi/2$ 과 수식 (6)

θ_3 의 변화량의 두 배 만큼 θ_2 를 변화시킨다.

step 1) 과 step 2) 의 과정에서 조건을 만족한다면 엔드이펙터가 평행하게 움직인다.

위 조건의 trajectory가 타당한지 검증하기 위해서 ROS의 GAZEBO를 이용하여 가상으로 3번 동작을 구현했다⁽⁶⁾. 구현 결과 엔드이펙터는 평행하게 움직였고 경로가 타당함을 알 수 있다.

(3) 실제 구동의 차이점과 해결방법

실제 motor로 동작을 구현하게 된다면, 이론적인 결과와 차이가 있다. 그 이유는 대표적으로 두 가지가 있다.

첫 번째 원인은, Fig. 14과같이 조인트 부분이 π 만큼 회전하는 데 필요한 모터 회전량이 다르기 때문이다.

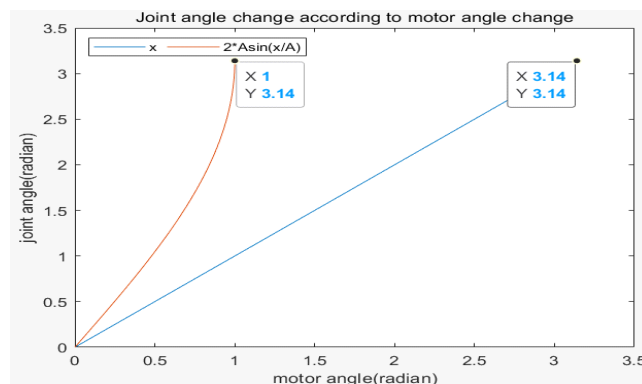


Fig. 16 joint angle change according to motor angle change

Fig. 16과 같이 차이가 나게 되는 이유는 조인트 부분에 모터가 있을 때의 구동과 달리 와이어를 이용한 구동은 베이스 부분에서 모터의 각도 변화에 따른 와이어의 길이 변화를 이용해 조인트의 각 변화를 일으키기 때문이다. 3번 조인트의 경우 Fig. 17과 같은 방식으로 수식 (13)과 같이 조인트 각도가 변화할 때, 얼마만큼의 와이어의 변화량이 필요한지 알 수 있다. 또한, 모터의 회전에 따른 와이어의 길이 변화는 $R \cdot \theta_3$ 이라고 할 수 있으므로 이를 이용하여 역산하면 모터가 회전할 때 조인트의 각 변화를 알 수 있으며 수식 (14)와 같이 나타난다.

마찬가지로 조인트 4, 5번도 와이어 구동을 하므로 조인트 3번과 같이 어떠한 공식을 통하여 와이어의 길이 차이를 나타내는지 알 필요가 있다. Fig. 18을 통하여 어떠한 방식으로 구동하는지 살펴볼 수 있고 나오는 수식은 수식 (15), (16)과 같으나 우리는 특이한 조건($\theta_4 = -\pi/2$ or $\pi/2$, $\theta_4=0$)에서 사용하고 이를 사용해 역산해보면 수식 (17), (18)과 같다.

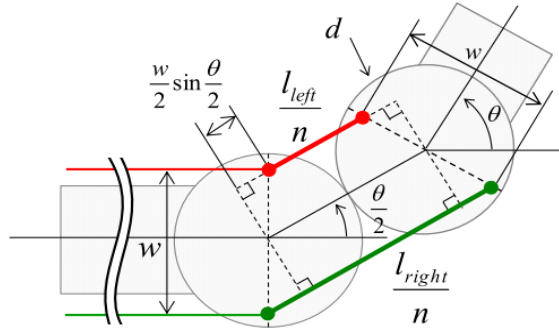


Fig. 17 elbow joint Relationship between the wire motion and joint angle

(Kim Yong Jae, “Anthropomorphic Low-Inertia High-Stiffness manipulator for High-Speed Safe Interaction”)

$$\Theta_3 = N_3 W_3 \sin(\theta_3/2) / R_3 \quad (13)$$

$$\theta_3 = 2A \sin\left(\frac{R_3}{N_3 W_3} \Theta_3\right) \quad (14)$$

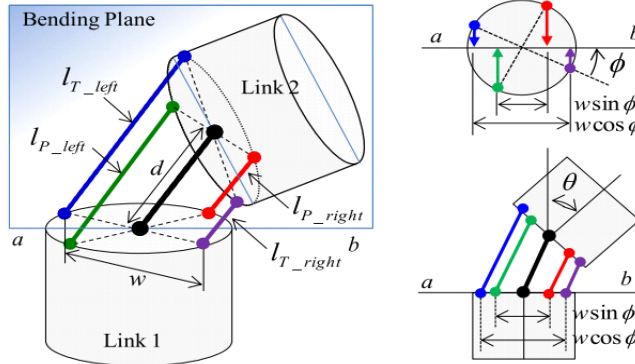


Fig. 18 wrist joint Relationship between the wire motion and joint angle

(Kim Yong Jae, “Anthropomorphic Low-Inertia High-Stiffness manipulator for High-Speed Safe Interaction”)

$$\Theta_4 = N_4 W_4 \sin(\theta_4) \sin(\theta_5/2) / R_4 \quad (15)$$

$$\Theta_5 = N_5 W_5 \cos(\theta_4) \sin(\theta_5/2) / R_5 \quad (16)$$

$$\theta_4 = \text{Atan}\left(\frac{N_5 W_5 R_4 \Theta_4}{N_4 W_4 R_5 \Theta_5}\right) \quad (17)$$

$$\theta_5 = 2A \sin\left(\sqrt{\left(\frac{R_4 \Theta_4}{N_4 W_4}\right)^2 + \left(\frac{R_5 \Theta_5}{N_5 W_5}\right)^2}\right) \quad (18)$$

두 번째 원인은 모터 구동이 등속 구동이 아닌 가속-등속-감속 형태의 구동을 하기 때문이다.

모터가 실제로 등속 구동으로 각도가 일정하게 변하는 것이 아니라 ARDUINO에서 AccelStepper로 구동을 하여 Fig. 19 과같이 가속-등속-감속의 형태로 각속도가 변하면서 진행된다. 각속도가 변화하기 때문에 예상했던 것보다 오차가 더 크게 된다.

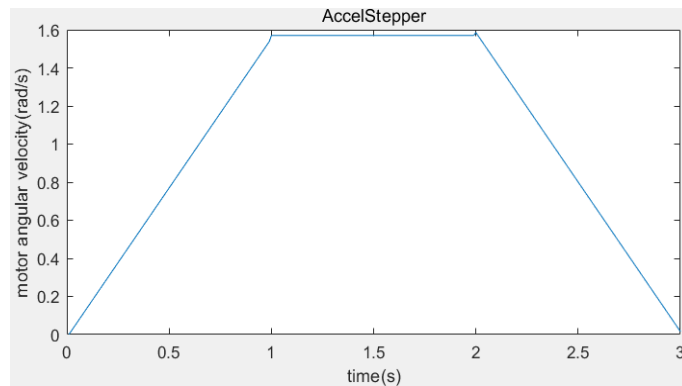


Fig. 19 AccelStepper

위와 같은 구동 방식의 차이 때문에 엔드이펙터가 평행하게 움직이는 것이 실제로는 힘들어진다. 그 이유는 엔드이펙터를 평행하게 구동하기 위해서는 수식 (6), (7)의 조건을 유지할 필요가 있다. 하지만, θ_2 는 감속기와 모터가 붙어있는 구조이고, θ_3 는 와이어를 이용한 모터 구동이라는 차이점 때문에 문제가 발생한다. 이를 그래프를 그려보면, 같은 시간 동안 조인트 부분이 π 만큼 회전하게 된다면 Fig 20과 같이 진행된다. 이때 최대 각도의 차이는 $0.6601 \text{ rad}(37.82^\circ)$ 로 수저가 지표면과 평행하게 있다고 보기에는 무리가 있다.

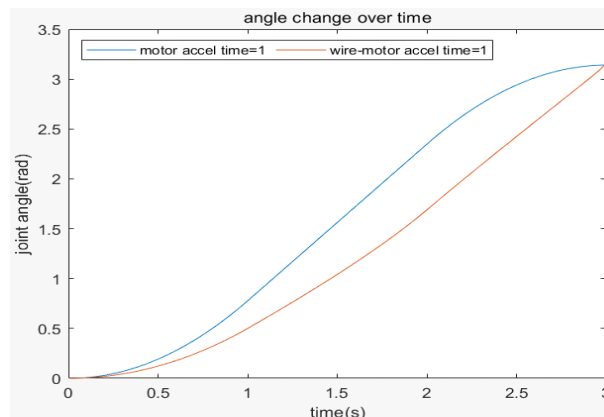


Fig. 20 angle change over time-motor and wire-motor

이를 해결하기 위해 바꿀 수 있는 요인은 AccelStepper의 구동 중 가속 시간을 다르게 하는 방법(모터 2, 모터 3)과 모터의 구동 시간을 다르게 하는 방법으로 총 세 가지 변수가 존재한다. 모터 2, 모터 3의 가속 시간을 변경하며 차이를 줄이는 것은 Fig 21과 같이 진행된다.

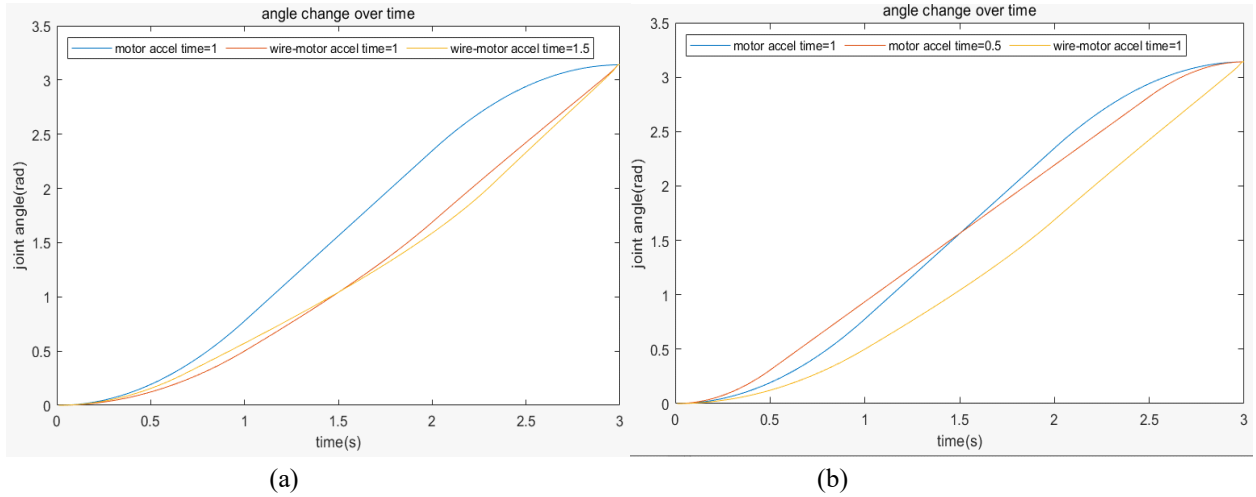


Fig. 21 angle change over time during change accel time: (a) change wire-motor accel time(motor 3); (b) change motor accel time(motor 2)

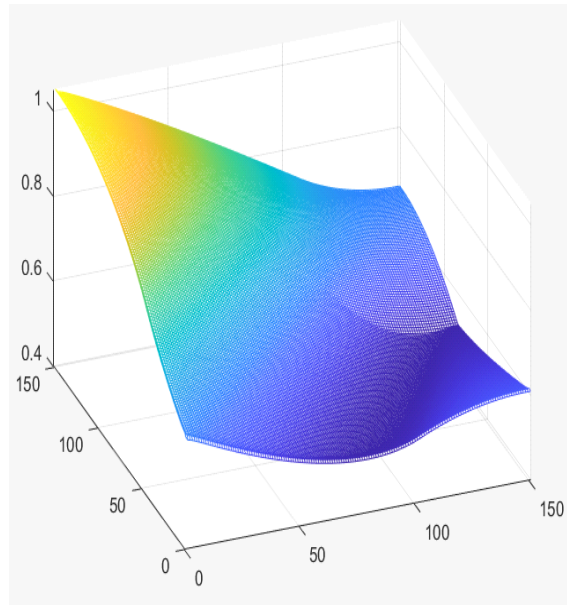


Fig. 22 time deference between motor and wire-motor during change accel time

MATLAB을 이용하여 결과를 살펴보면 최저수치는 $0.5227\text{rad}(29.94^\circ)$ 이다 처음 보았던 수치보다는 줄어들기는 하였으나 아직도 평행을 유지한다고 보기에는 무리가 있다.

모터 2, 모터 3의 구동 시간을 다르게 한다고 가정하면 Fig 22을 살펴보았을 때 모터 2의 구동 시간을 늘리거나 모터 2의 구동을 늦게 시작하면 줄어 들것으로 판단된다. 하지만 AccelStepper의 구동 메커니즘 상 시작 시간을 늦게 하는 것보다는 구동 시간을 늘리는 편이 알맞다. 이를 MATLAB을 통하여 구현하면 Fig. 23과 같고, 차이는 $0.1966\text{ rad}(11.26^\circ)$ 로 고려할만한 수치로 줄어든 것을 볼 수 있다.

이를 종합하여 3개의 변수로 최저 차이를 구해보면 $0.1538\text{rad}(8.812^\circ)$ 의 차이가 나게 되고 엔드이펙

터가 어느 정도 평행을 유지한다고 볼 수 있는 수치를 지니게 된다.

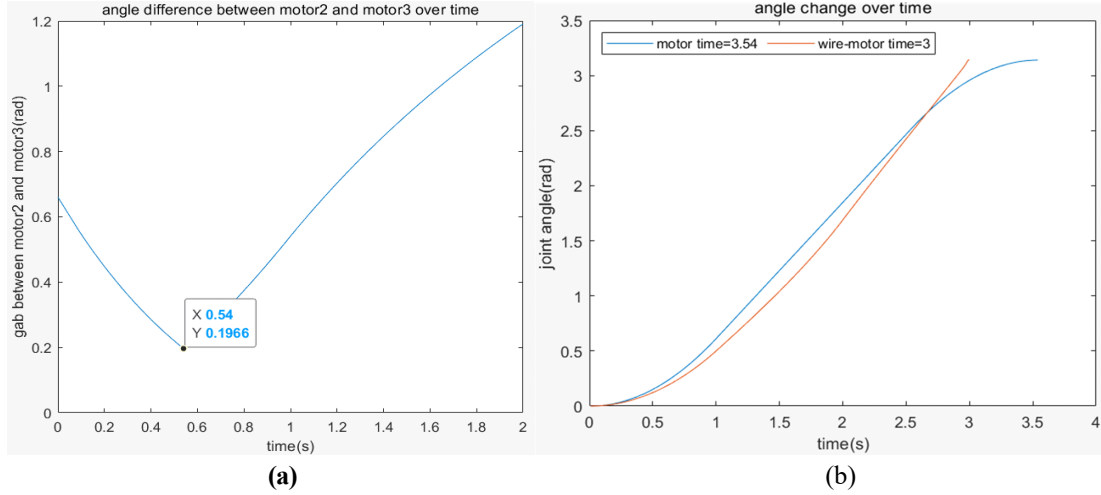


Fig. 23 (a) angle between motor 2 and motor 3; (b) angle change over time(motor 2 =3.54s, motor 3 =3s)

2.4 영상처리 및 전체 제어 과정

사용자의 편의성을 증가시키기 위해 사용자의 입을 식별하고 입의 벌림을 판단한 뒤, 입을 벌렸을 때 입의 위치에 가장 적절한 수저의 경로를 생성한 뒤 음식물을 가져다주는 방법을 사용했다. 이 경우 문제는 입의 위치 파악, 입 벌림 유무 판단, 그리고 음식물을 흘리지 않게 사용자에게 가져다주는 방법 이었고 이를 아래와 같이 고안했다.

2.4.1 입 식별 및 위치 파악

사람의 입을 식별 및 입 벌림 유무를 판단을 dlib⁽⁸⁾를 사용하여 구현하였다. dlib란, 머신러닝 및 얼굴 인식에 주로 사용되는 오픈소스 기반의 라이브러리로서, 이를 통해 사람 얼굴의 특징점[Fig. 24]을 추출하고, 추출한 특징점 중 입술에 해당하는 특징점 간의 거리를 연산함으로써, 입의 벌림 유무를 알 수 있다. 또한, 각 특징점의 위치를 깊이카메라(depth camera)에서 받아온 깊이 정보와 정합하여 입의 공간상 위치 또한 알 수 있으며, 이를 최종 도착점으로 하는 경로를 생성하였다.

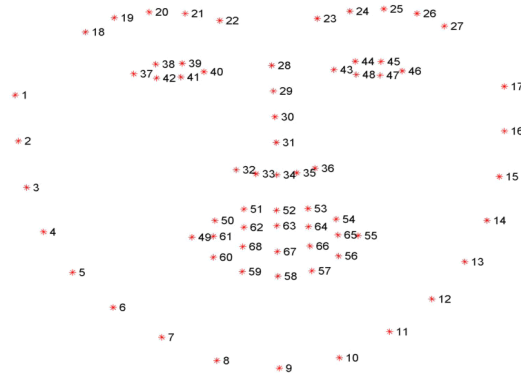


Fig. 24 Human face feature point set

$$mouth\ open\ ratio = \frac{dist(51, 59) + dist(53, 57)}{dist(49, 55)} \quad (19)$$



Fig. 25 detecting mouth open using feature point

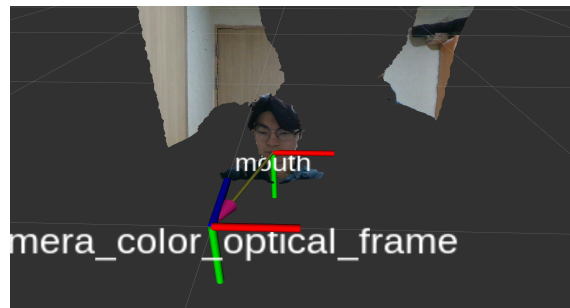


Fig. 26 mouth position estimation using depth camera

Fig. 27은 2. 설계 및 제작 의 과정을 바탕으로 완성된 식사보조로봇의 모습이며, 동력부가 모두 로봇 팔의 베이스 부분에 위치하여 각 조인트가 움직일 수 있는 동력을 와이어를 통해서 전달하여, 매니플레이터의 질량 및 관성을 줄이고 역구동성을 확보하여 더욱 안전한 상호작용을 피할 수 있고, 우측의 텡스카메라를 통해 사용자의 의도를 파악하고, 사용자의 현재 위치에 맞는 수저 궤적을 생성함으로써, 편의성 또한 확보하였다.



Fig. 27 Design result

최종 설계결과물의 동작 과정은 다음과 같다. 우선, 전원이 들어온 경우, 시스템은 초기 모드에 들어가게 된다. 이 경우 기구는 자체적으로 초기자세를 잡게 되며, 초기자세를 잡은 이후에는, 대기 모드

(wait mode)에 들어가게 된다. 대기 모드에서 시스템은 깊이카메라(depth camera)를 통해 들어오는 사용자의 얼굴의 이미지를 분석하며, 입이 벌어질 때까지 기다린다. 입이 벌어질 때 시스템은 음식을 퍼 올리는 동작을 하는 스쿱핑 모드(scooping mode)가 되며 미리 저장된 음식을 퍼 올리는 모션을 수행하게 된다. 음식을 퍼 올리는 과정을 마치게 되면 최종적으로 시스템은 피딩 모드(feeding mode)에 들어가며, 현재 사용자의 입의 위치에 대한 수저의 궤적을 생성, 및 궤적을 따라 로봇팔을 움직이며, 사용자에게 음식을 가져다주고, 다시 대기모드에 들어가며, 작업을 반복하게 된다.

최종설계결과물의 경우 기존의 기존 제품의 문제점인 안전성 및 편의성을, 와이어메커니즘을 통하여 저 관성, 저 질량, 역구동성을 확보한 기구부와, 수저의 자동 궤적생성 및 얼굴인식에 기반을 둔 영상처리 알고리즘을 통하여 보완한 식사보조로봇으로서, 혼자서 식사를 할 수 없는 사람들이 많고, 많은 복지 인력이 필요한 요양시설에 특히 유용할 것으로 기대된다.

4. 결 론

대부분의 사람들은 특별한 식사가 아니더라도 전날 점심에 먹었던 음식을 단번에 기억해내지 못할 것이다. 그만큼 식사란 일상적이고 당연하고 간단한 일이기 때문이다. 하지만 소수의 사람에게 있어 식사는 도저히 혼자서 할 수 없는 일이기도 하다. 이들에게 식사란 남의 도움을 받아야 하고 번거로우며, 힘들기까지 한 활동일 것이다. 이런 이들을 위한 식사보조로봇은 이미 시중에 출시되어있지만, 조인트에 동력부가 붙어있고, 사용자의 편의성을 고려하지 않아 보조 인원이 필요한 등 제 기능을 못 하는 경우가 많았다.

이러한 기존 제품의 문제점을 와이어메커니즘을 적용한 5 자유도의 매니퓰레이터와 영상처리 알고리즘, 음식을 흘리지 않을 수 있도록 제어할 수 있는 궤적생성 알고리즘을 사용하여 안전성과 편의성에 초점을 둔 식사보조로봇의 개발을 진행하였다.

본 기구는 와이어 메커니즘의 적용으로 인해, 구동에 필요한 모터 및 모터드라이버의 필요성능이 크게 낮아져, 값싼 부품을 이용해서 만들 수 있다. 그리고 이미 사용자의 편의성을 위해 깊이카메라가 달려 있고 이동식 테이블로 만들어져 있기 때문에, 깊이 카메라를 통한 SLAM과 navigation 기능을 구현한다면 모바일 로봇으로서, 주방에서 조리된 음식을 직접 사용자에게 가져다주고 식사를 보조해 준 뒤 다시 주방으로 돌아가는 등 더 다양한 발전을 할 수도 있을 것이라 기대된다.

참고문헌

- (1) Kim Yong Jae, "Anthropomorphic Low-Inertia High-Stiffness manipulator for High-Speed Safe Interaction," IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, VOL. 33, NO. 6, pp. 1358-1374, 2017
- (2) Aofei Tang, Yan Lia, Hao Qua, Junbao Xiao, "Dynamics modeling and simulating analysis of a wire Driven parallel Mechanism", procedia engineering, pp. 788-794, 2011.
- (3) Kim Yong Jae, Kin Jong-In, Jang Woo Seok, "quaternion joint : Dexterous 3-DOF joint Representing quaternion Motion for High-Speed Safe Interaction," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 935-942, 2018
- (4) KAERI, "Design and Evaluation of Cable-driven Manipulation with Motion-decoupled joints", KINTEX, 2008.
- (5) Alireza Khatamian, "Solving Kinematics Problem of a 6-DOF Robot manipulator", Int'l Conf. Scientific Computing pp. 228~233, 2015
- (6) GAZEBO simulation feeding mode youtube video :
<https://www.youtube.com/watch?v=QtdHwnEHwJ8&feature=youtu.be>
- (7) ar track alvar official website : <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj2/multimedia/alvar/index.html>
- (8) dlib official website : <http://dlib.net/>