

다자유도 비강 자동 검체 채취 로봇 메커니즘 개발

Development of Multi-DoF Automatic Nasopharyngeal Swab Sampling Robot

이종복¹·김호빈¹·김선우¹·김상도²·이호석³·김용재⁴·박신석⁵·이종원[†]
Jongbok Lee¹, Hobin Kim¹, Sunwoo Kim¹, Sangdo Kim², Hoseok Lee³,
Yong-Jae Kim⁴, Shinsuk Park⁵, Jongwon Lee[†]

Abstract: To control the spread of COVID-19, it is important to identify the infection in its incipient stages so that the infected persons can be dealt with accordingly. The currently used face to face sampling method may increase the risk of infection for medical professionals as it exposes them to the asymptomatic yet infectious patients. This can result in further increases in the load on the medical system and workload of the medical staff. As a solution to this problem, in this paper, we present a robotic system for rapid non-face-to-face automatic nasopharyngeal swab sample collection. The system consists of a custom designed 7-DoF manipulator equipped with a specially developed safety mechanism for restricting the maximum force applied by the tip of the swab. During the swab sampling process, the force applied by the tip of the swab is continuously monitored in real-time by a 3-axis force sensor in order to detect contact with the nasopharynx. The possibility of using this system for automatic nasopharyngeal swab sample collection is proven through experimentation with a phantom model.

Keywords: Automatic Swab Sampling Robot, Nasal Sampling, Quarantine Robot, COVID-19

1. Introduction

2019년 말 코로나19가 발생한 후 약 3년의 시간이 지났다. 코로나19 초기에는 3%의 치명률을 갖는 델타 바이러스가 우세종으로 확산되어 전 세계적으로 많은 확진자와 사망자를 발생시켰다. 현재는 오미크론의 변이인 스텔스 오미크론 BA.2

가 우세종으로 국내 치명률은 0.1% 수준으로 감소했으나, 더욱 높은 전염성으로 국내에서는 아직까지도 하루 수만 명이상의 확진자가 발생하고 있다. 코로나19 유행관리의 대표적인 어려움은 무증상 감염 전파이다. 감염환자의 40-50%가 증상 없이 바이러스를 전파할 수 있으며, 감염 전파 사례의 50% 이상이 무증상 시기에 발생한다고 보고되었다. 코로나19의 유행관리를 위해서는 무증상 감염자에 대한 지속적이고 광범위한 검체 채취와 검사가 무엇보다 중요하다^{1,2}.

현재 코로나19 검사는 비인두 도말 검체 채취를 통한 유전자증폭 검사(RT-PCR)방법과 신속 항원 검사(Antigen)방법을 통해 실시되고 있다. 신속 항원 검사는 유전자증폭 검사보다 가격이 싸고 결과가 빨리 나온다는 장점이 있지만, 무증상 감염 환자에 대한 민감도가 매우 낮게 나타나는 단점이 있다³. 또한, 피시험자의 입에서 검체 채취를 수행하는 구인두 도말 대비 코에서 검체 채취를 수행하는 비인두 도말을 통한 유전자증폭 검사의 민감도가 15% 이상 높게 나타난다는 연구 결과에 따라, 무증상 감염자를 사전에 식별하고 격리하기 위한 검체 채취 방법으로 비인두 도말 유전자증폭 방법을 사용하는

Received : Nov. 22. 2022; Revised : Dec. 30. 2022; Accepted : Jan. 15. 2023

※ This work was supported in part by the Korea Institute of Science and Technology Institutional Program under Grant KIST 2E31561, and by the Korea Advanced Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT (2020M3H8A1115027)

1. MS Student, KIST, Seoul, Korea (ljb920615, msvc7085, 122008@kist.re.kr)

2. Student Researcher, KIST, Seoul, Korea (sangdo322@kist.re.kr)

3. BS Student, Division of Robotics, Kwangwoon University, Seoul, Korea (lhs03057@naver.com)

4. Associate Professor, Koreatech, Cheonan, Korea (yongjae@koreatech.ac.kr)

5. Professor, School of Mechanical Engineering, Korea University, Seoul, Korea (drsspark@korea.ac.kr)

† Senior Researcher, Corresponding author: Center for Intelligent & Interactive Robotics, KIST, Seoul, Korea (jwlee@kist.re.kr)

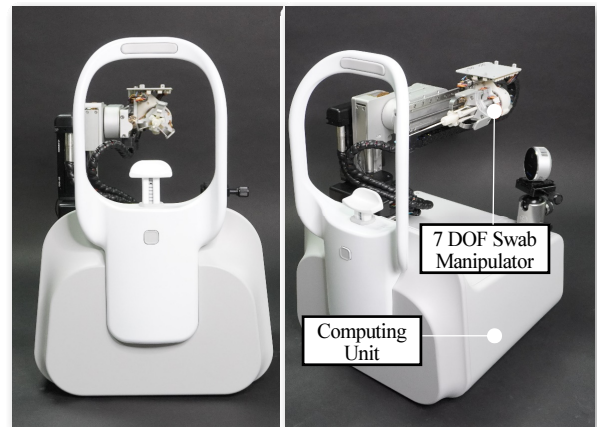
것이 현재 가장 권장되는 방법이다⁴⁾.

현재 선별진료소에서 진행하는 코로나19 검사는 의료진이 직접 환자를 대면하여 수행하기 때문에, 검체 채취 중 피검사자의 구역 반응이나 기침 등에 의해 바이러스가 의료진에게 전염될 가능성이 크게 존재한다. 이를 막기 위해 의료진은 항상 전신 보호복, 오버 부츠, 마스크, 고글, 장갑을 포함하는 레벨 D 개인 보호구를 입고 착용하고 검체 채취를 수행한다. 하지만 의료진이 보호구를 착용하고 업무 수행 시 업무 피로도가 현격히 증가된다는 결과가 보고되었으며⁵⁾, 개인용 보호구를 착용 후 두통 등 신체 건강상 문제를 겪었다는 설문 조사 결과도 있었다⁶⁾.

이를 해결하기 위해 현재까지 여러 연구기관에서 환자와 의료진의 직접 대면으로 인해 발생할 수 있는 안전성과 과도한 업무 부하를 해결하기 위한 자동 검체 로봇 연구를 진행해 왔다. 한국기계연구원에서는 환자와 분리된 공간에서 마스터-슬레이브 시스템을 활용하여 원격 검체 채취를 수행할 수 있는 검체 로봇을 개발하였다⁷⁾. 중국의 선전 연구소에서는 산업용 로봇 UR5에 검체 엔드이펙터를 장착하여 영상기반 구인두 도말 검체 채취를 자동으로 수행하는 로봇을 개발하였다⁸⁾. 덴마크의 Lifeline 로보틱스 사에서는 검체 매니플레이터를 통해 검체 채취를 한 후 면봉의 후처리 작업까지 자동으로 수행하는 검체 로봇 시스템을 개발하였다⁹⁾. 이처럼 다수의 연구 기관들에서 코로나19 검사 시 의료진의 직접 대면으로 인한 전염을 막기 위해 로봇 기술을 활용한 솔루션을 개발하였지만, 원격 조작 시 hand-eye coordination의 문제로 기존보다 검체 채취 소요 시간이 증가하는 문제, 구인두 도말 검체 채취 시 낮은 민감도의 문제, 산업용 로봇을 활용 시 넓은 공간이 요구되어 선별진료소 등 실제 의료현장 배치가 제한이 있는 여러 한계점이 있었다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 초소형 7자유도의 비강 자동 검체 매니플레이터 메커니즘을 제안한다. 선별진료소라면 어디에나 책상 위에 올려 활용할 수 있을 수준의 콤팩트 한 크기로, 10세부터 70세 성인까지 활용 가능하도록 설계되어 의료진의 안전성과 업무 부하를 줄임과 동시에 실제 의료현장에서의 활용도를 높이고자 하였다. 개발된 로봇 프로토타입은 펜텀 기반 검체 채취 실험을 통해 자동 검체 가능성을 증명하였다.

본 논문은 아래와 같이 구성된다. 2장에서 자동 검체 채취를 수행하기 위한 매니플레이터의 작동 영역과 자유도의 요구 사항을 도출하고, 이를 만족시키기 위한 다자유도 검체 매니플레이터의 메커니즘에 대해 기술하였다. 3장에서는 펜텀 모델을 대상으로 한 검체 채취 실험을 수행하여 제안한 검체 매니플레이터를 통한 비강 자동 검체 채취 가능성을 검증하였다. 4장에서는 결론과 함께 향후 진행될 연구에 대해서 기술하였다.



[Fig. 1] Proposed Autonomous Swab sampling Robot Prototype (RapidSwab)

[Table 1] Swab sampling robot Specification

Weight	13 kg (Including industrial SBC)	
Dimensions	355 mm × 410 mm × 545 mm	
DOF	Manipulator	7 DOF (x-y-z-θ, tilt RCM rotation, swab insertion&rotation)
Sensing	3-axis NasopharynxTouch Detection - Range : 10 N, Resolution: 0.0004 N	
Actuation	Direct Driven, actuated by ballscrews and BLDC Motors (x-y-z, swab insertion manipulation) Cable Driven, actuated by Timing Belt and BLDC Motors (RCM, swab rotation)	
Electronics	DC 24V, MAXON EPOS4 24/5 EtherCAT 3-axes x 4	

2. Design and Implementation of the Robot

[Fig. 1]은 KIST에서 개발한 비강 자동 검체 채취 로봇 시스템이다. 진단키트의 검체 면봉을 장착하여 검체 채취를 수행하는 7-자유도 검체 매니플레이터, 로봇 제어기, 기구학적 오차 및 초기 변형을 극복하기 위한 LiDAR 카메라로 구성되어 있다.

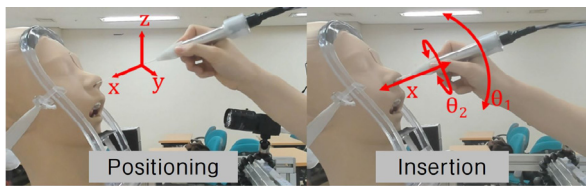
검체 채취를 위해 안면 고정 지그에 사람이 얼굴을 위치 시키면, 비전 게이던스 기반 로봇 제어를 통해 사람의 코를 인식하여 면봉 끝을 콧구멍 앞으로 이동시킨다. 그 후 면봉 삽입 각도를 조절하여 검체 채취를 수행한다. 검체 채취를 수행하는 동안 면봉의 비강 접촉 여부를 판단하기 위한 3축 힘센서와 접촉 최대 힘을 제한하는 기계적인 안전 메커니즘을 통해 피검사자의 안전을 보장한다. [Table 1]은 로봇의 세부 사항을 나타낸다.

2.1 System Requirement

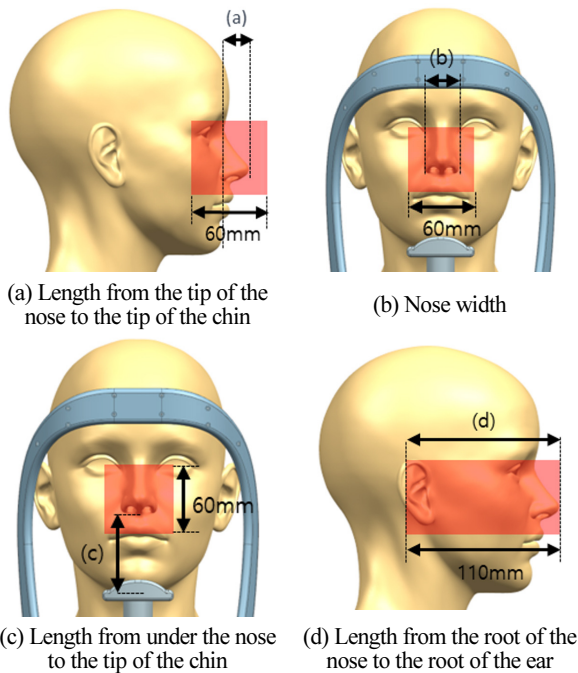
기존 의료 전문가의 수작업 검체 채취 시 손목 및 손가락 움직임을 모사하는 로봇 검체 채취를 수행하기 위해서, 검체 매

니플레이터의 필요 자유도와 피시험자의 신체 치수를 분석한 작동 영역을 분석하였다. 비강 검체 채취를 수행하기 위해서는 기본적으로 1) 피시험자의 콧구멍 입구로 비강 검체 채취용 면봉의 끝을 이동, 2) 전비공부터 비인두에 이르는 비강 내 구조를 고려하여 면봉의 삽입 각도 조절 및 면봉 삽입, 3) 면봉의 끝에 바이러스를 묻히기 위한 면봉 회전, 4) 바이러스를 묻힌 면봉을 UTM 내 밀봉 하기 위한 위치로 이동이 필요하다.

[Fig. 2]와 같은 동작을 로봇으로 구현하기 위해 X, Y, Z 방향 이동 3자유도 이동으로 1)의 동작을 수행하며, 2)를 위한 RCM Tilt 각도 조절(θ_1)의 1자유도, 3), 4)를 수행하는 Insertion,



[Fig. 2] Swab sampling motion of medical staff, Three DoF for x-y-z positioning and Three DoF for Swab sampling are required



[Fig. 3] Measurement section of the human head

[Table 2] The size of the human head, age from 10 to 70 in Korea^[10]

(mm)	Mean	Min	Max	The 1st percentile	99th percentile
Horizontal length from the tip of the nose to the tip of the chin	24.91	1	57	4	57
Nose width	37.52	24	57	30	48
Vertical length from under the nose to the tip of the chin	60.73	41	88	46.13	80
Length from the root of the nose to the root of the ear	78.96	52	117	57	105

Rotation (θ_2) 모션을 갖는 2자유도 엔드이펙터가 필요하다. 추가로, 검체 채취 후 면봉을 용기 방향으로 회전시켜 용기에 투입하기 위한 Z축 회전 자유도를 포함하여 총 7자유도의 검체 매니플레이터 요구 자유도를 도출하였다.

위에서 언급한 1)에서 4)와 같은 검체 채취에 필요한 동작을 구현하면서도, 개발된 자동 검체 로봇이 집중의료현장의 선별 진료소 어느 곳에서도 손쉽게 설치되어 운용할 수 있도록 작고 컴팩트 하게 개발이 되어야 하는 요구사항이 동시에 존재한다.

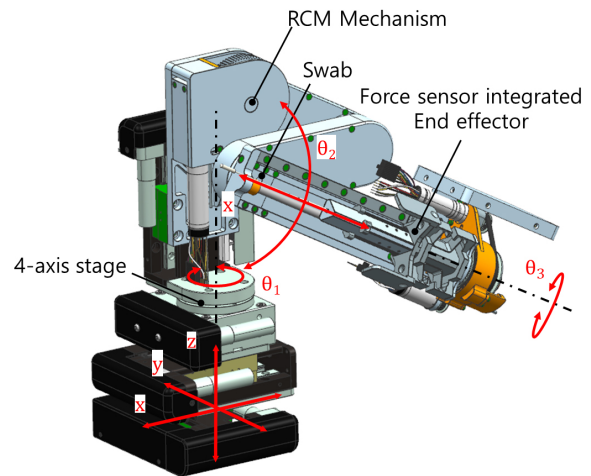
본 연구에서는 요구되는 자동 검체 로봇 동작에 필요한 작동 영역을 도출하기 위해, 로봇의 사용자군을 대한민국 10세~70세 남녀로 설정하여 사용자군의 두상 크기 1분위~99분위 데이터를 메커니즘 개발에 활용하였다^[10]. 검체 로봇 개발에 필요한 신체 치수는 [Fig. 3]에 표현된 것처럼 피시험자의 턱끝에서 코끝까지의 수평거리, 코너비, 코밑에서 턱 끝까지의 수직 길이를 포함하며, 이 치수에서 대상자 간의 편차 정보의 추가적인 고려가 필요하다. X축, Y축, Z축으로 각각의 치수 편차의 상한이 53 mm 인 점을 고려하여, 선형 스테이지를 통한 로봇 작동 translation 범위를 각각 60 mm로 설정하였다.

충분한 면봉 삽입 깊이를 결정하기 위해 코 끝부터 비인두까지의 거리의 유사 지표인 코뿌리에서 귀바퀴위뿌리까지의 거리 정보를 활용하였다. 피시험자 신체 치수의 99분위 정보가 105 mm로, 이를 포함할 수 있도록 삽입 거리를 110 mm로 설정하였다.

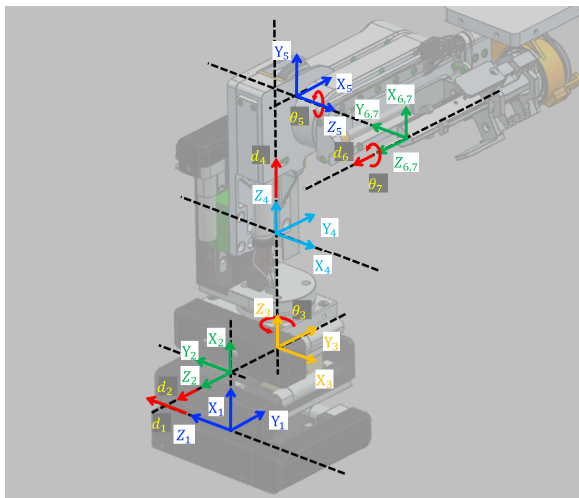
작동 영역을 도출하기 위해 활용한 대한민국 10세~70세 인체치수 1분위~99분위 데이터는 각 측정 위치별로 구분하여 [Table 2]에 정리했다.

2.2 Multi-DoF Swab Sampling Mechanism

[Fig. 4]는 2.1절에서 검토한 로봇의 요구사항을 고려하여



[Fig. 4] 7-DoF Swab Sampling manipulator



[Fig. 5] Swab sampling robot joints axis

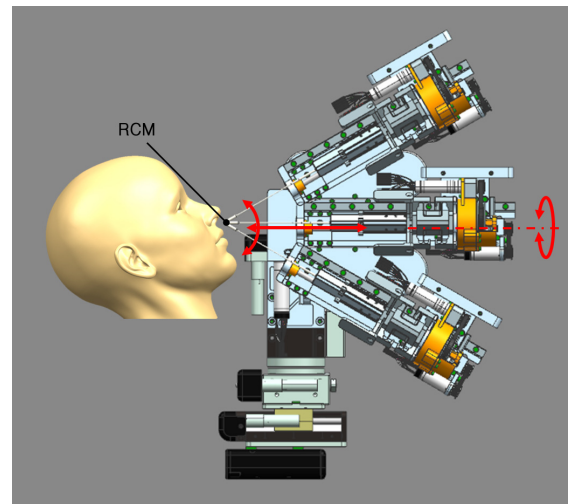
[Table 3] Swab sampling robot DH parameter

Joint	a (mm)	α (degree)	d (mm)	Θ (degree)
1	73	90	d1	0
2	0	-90	d2-22.5	-90
3	0	0	104	Θ 3
4	19	90	d4+90	90
5	0	-90	98.5	Θ 5+90
6	0	0	d6	0
7	0	0	0	Θ 7

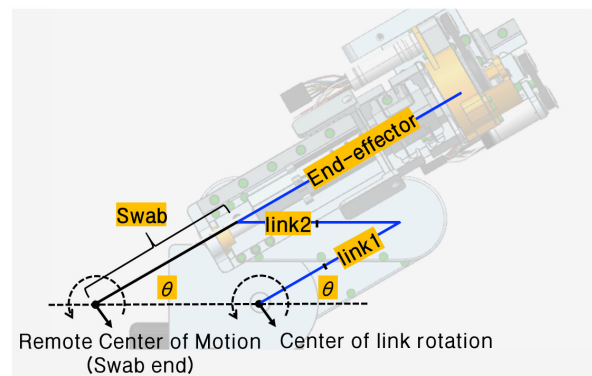
개발된 7 자유도 비강 자동 검체 로봇 매니플레이터이다. 베이스부터 면봉을 코앞으로 이동시키기 위한 X-Y-Z 선형 스테이지와 검체 채취 후 면봉을 피시험자 측면으로 위치시키기 위한 로터리 스테이지가 Y-X- Θ -Z 축 순으로 순차적으로 연결되어 있다. Z축 말단에는 면봉의 비강내 삽입 각도를 맞추기 위한 RCM (Remote Center of Motion) 메커니즘과 RCM 메커니즘 말단에 면봉의 삽입과 바이러스 채취를 위한 회전 자유도를 가지는 엔드이펙터의 3 자유도가 추가적으로 구성되어 있다.

또한, 면봉에 가해지는 미세 힘을 측정하여 비인두 접촉 여부를 판별하기 위한 3축 capacitive-type force sensor가 적용되어 있다. 엔드이펙터는 외부 힘을 순응하여 변형되는 세 개의 flexure 구조로 이루어져 있으며, 구조물에 정착된 센서가 각 축의 변형에 따른 capacitance 변화량을 측정하고, calibration 을 통해 이 값을 환산하면 면봉 끝에 가해지는 x, y, z 방향 힘을 구할 수 있다¹¹⁾.

[Fig. 5]에 각 관절의 좌표축을 설정하여 모델에 표기했으며, [Table 3] 는 DH 표기법에 맞춰 기구학 파라미터값을 정리한 내용이다. [Fig. 6(a)]에서 1, 2, 4번 축의 리니어 스테이지에는 Maxon ECX SPEED 13 M과 감속비 16:1의 감속기가 장착



(a)

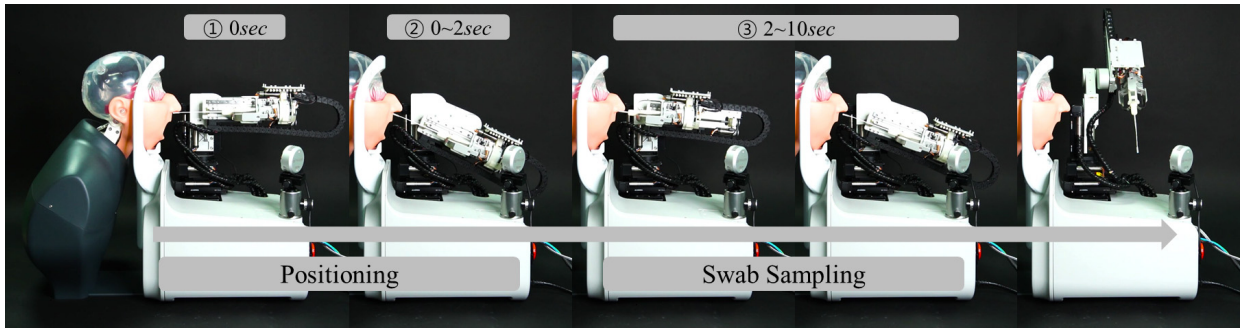


(b)

[Fig. 6] 3-DoF manipulator for swab sampling motion, (a) RCM (Remote Center of Motion) mechanism makes the end of the swab center of rotation. It is similar to the movement of the wrist of medical staff. The end-effector combined with RCM mechanism conducts the 2-DoF motion of swab insertion and rotation, and includes the 3-axis force sensor and the special safety mechanism to absorb disturbance force generated by robots or humans, (b) The driving principle of the RCM mechanism

된 모터에 볼스크류 벨트 풀리 기반으로 구동되어, 정격 출력 96.36 N, 최대 동작 속도 200 mm/s로 작동하도록 개발되었다. 3번의 회전 스테이지도 16:1 감속비를 갖는 구동기에 기어비 180:1 웜기어 조합으로 장착 후 7.89 Nm 출력, 최대 회전 속도 66.6°/s 로 작동되도록 개발되었다.

5번 축에는 검체 채취 시 의료진의 손목 움직임과 동일하게 면봉 삽입 각도를 조절하기 위한 RCM 회전이 가능한 메커니즘이 적용되어 있다¹¹⁾. RCM 메커니즘은 평행사변형 4절 기구에서 고정 링크의 한 점을 엔드이펙터의 끝으로 두어 링크 회전 시에도 그 점을 중심으로 일정하게 움직이는 원리가 적용되었다. 이를 통해서 면봉 끝을 기준으로 하는 회전 운동을 하여 삽입 각도를 결정한다.



[Fig. 7] Swab sampling procedure. The x-y-g motion for positioning takes 2 sec. It takes 10 sec until end of the swab sampling

[Fig. 6(b)] 각 링크 및 엔드이펙터는 폴리와 타이밍벨트로 연동되어 움직이며, 폴리의 구속 상태에 따라 1번 링크와 엔드 이펙터는 동일한 각도로 회전하고, 2번 링크는 수평운동만 하는 방식으로 면봉 끝을 회전 중심을 만들 수 있다.

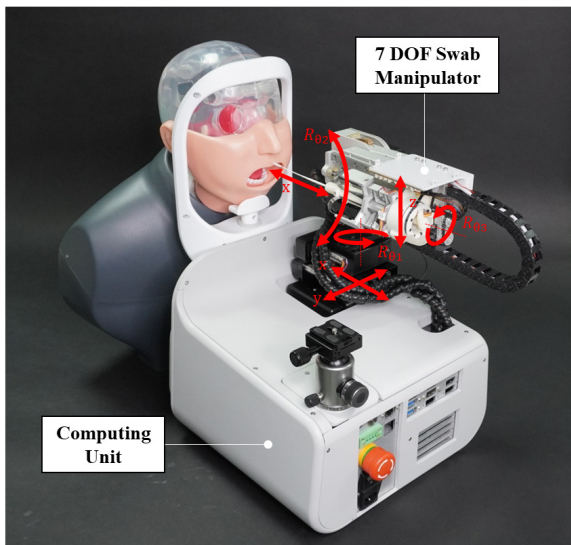
6, 7번 축에는 면봉을 비강 내 삽입하기 150 mm 구간의 직선 운동 자유도와 비인두에 닿은 면봉을 회전시켜 면봉에 검체를 묻히기 위한 회전 자유도가 구성되어 있다. 검체 채취 시 비강에 면봉이 접촉되었는지 인식하기 위한 3축 힘센서와 로봇이나 사람의 갑작스러운 움직임으로부터 피검사자를 보호하기 위한 힘 제한 안전 메커니즘이 구비되어 있다.

3. Experiments and Results

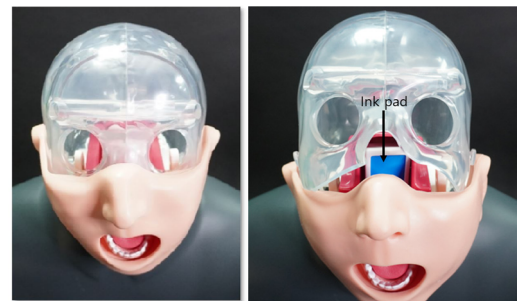
위와 같이 개발된 7축 자동 검체 메커니즘을 이용하여 팬텀 모델(Nasopharyngeal Swab Collection Simulator. Kyoto Kagaku Co., Ltd) 기반 비강 자동 검체 채취에 대한 매니플레이션 시험을 수행하였다. [Fig. 7] 자동 검체 채취 수행 실험 구성은 [Fig. 8]와 같다. 팬텀 모델은 실제 의료진이 비강 검체 채취를 연습하기

위해 개발된 실리콘 재질의 제품으로, 사람의 비강 내 구조를 모사하고 있다. 또한 [Fig. 9(a)]와 같이 면봉이 접촉하여 바이러스를 추출하는 비인두 위치에 색소를 도포할 수 있는 패드가 구비되어 있다. 검체 채취 시 해당 패드에 접촉하면 면봉에 색소가 묻어나는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 면봉의 정상 검체 채취 여부를 확인할 수 있다.

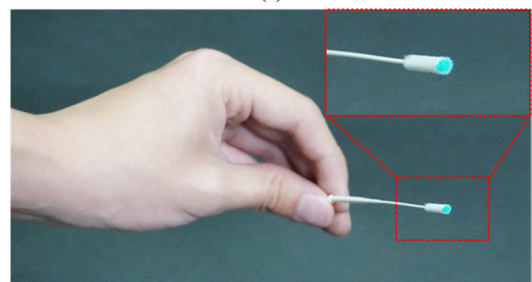
본 실험의 목표는 개발된 자동 검체 매니플레이터를 통해 검체 모션이 가능한지 확인하는 것이다. 팬텀 모델을 이용하여 로봇을 통한 비강 검체 채취 시, 의료진이 수작업 검체 채취 시와 같이 면봉이 비인두에 성공적으로 닿고 나왔는지를 육안



[Fig. 8] Experiment environment setting

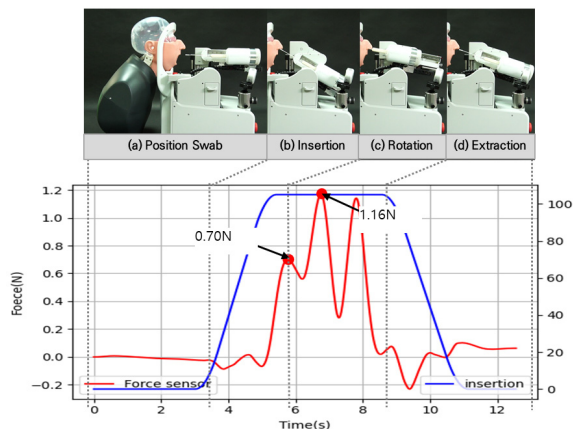


(a)



(b)

[Fig. 9] (a) The Nasopharyngeal Swab Collection Simulator, by using ink pad at the end of the nasal cavity model, It can be proven whether the end of the swab touches nasopharynx appropriately. (b) Experiment Result using Automatic Nasopharyngeal Swab Sampling Robot, the end of the swab have been turned the blue color after swab sampling test, and it refers that the end of the swab touched nasopharynx properly



[Fig. 10] Sampling force test results

으로 확인하고자 하였다. 팬텀의 비인두에 면봉이 정확히 닿았다면 비인두 위치의 색소가 묻어 나올 것이다.

자동 검체 채취 실험의 순서는 다음과 같다. 검체 로봇의 엔드이펙터에 비강 검체 채취용 면봉을 부착하면, 로봇은 위치 제어를 통해 팬텀의 코앞으로 면봉을 이동시킨다. 이후 코앞에서 면봉의 삽입 각도를 제어한 후, 검체 채취를 수행해서 비강 밖으로 빠져나온다. 실험 과정 중 로봇의 모션 제어는 팬텀 모델의 형상 정보를 고려하여, 사전에 결정한 면봉의 목표 위치를 순차적으로 따라가는 방식으로 진행하였다.

[Fig. 9(b)]은 팬텀 모델로 로봇 검체 채취 실험을 수행한 후 면봉의 모습을 나타낸다. 로봇 검체 채취 수행 후 푸른색의 색소가 면봉에 묻어 나오는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 로봇을 통한 검체 채취 시 면봉이 비인두 위치까지 들어가 정상적으로 접촉하며 검체 채취가 수행됨을 확인할 수 있다.

[Fig. 10]은 검체 채취동안 면봉 끝에 가해지는 힘을 측정한 결과이다. (b)의 Insertion 구간에서 면봉이 비강벽을 따라 들어가면서 힘이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 검체 채취 지점에 접촉했을 때 최대 접촉 힘은 0.7N이었다. (c) Rotation 구간에서는 면봉이 접촉 상태에서 회전함에 따라 측정 힘이 위아래로 변하는 것을 확인할 수 있었고, (d) Extraction 구간에서는 다시 힘이 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 의료진의 수작업 검체 채취시 면봉 끝에 가해지는 힘을 측정할 연구^[12]에서 검체 채취 지점인 비인두에 면봉이 접촉했을 때 측방향으로 약 0.7N의 힘이 작용한다. 자동 검체 로봇을 통한 검체 채취시에도 사람이 검체 채취를 수행하는 것과 유사한 힘이 면봉에 작용한다는 것을 통해 대체 가능성을 확인했다.

또, 시작점에서 면봉을 팬텀의 콧구멍 앞으로 이동하는 거리는 약 5cm 이내, 이에 소요되는 시간은 약 3초이고, 검체 채취를 성공적으로 수행 후 면봉을 코에서 추출할 때까지 소요되는 시간까지 총 12초가 소요되었다. 의료진의 손목과 손가락 모션을 성공적으로 모방함을 확인하였고, 이에 걸리는 시

간 또한 실제 의료진이 수작업 검체 채취를 수행하는 시간과 유사한 수준으로 확인된다.

4. Conclusions

본 연구에서는 현재 의료진이 수행하고 있는 코로나 검체 채취를 로봇으로 대신 하여 대면으로 인한 의료진의 감염 위험과 업무 부담을 줄이고, 집중 의료현장의 검체 수용 능력을 증대시키기 위해 로봇으로 검체 채취를 수행하고자 자동 검체 다축 매니플레이터를 제안했다. 그 대체 가능성 확인하기 위해 팬텀 모델을 통한 자동 검체 채취 실험을 진행했으며, 반복적인 실험을 통해 면봉이 비인두에 정확히 접촉하는 것을 검증했고, 검체 채취 소요 시간 또한 의료진의 수행 시간과 유사함을 확인할 수 있었다. 개발된 다축 검체 매니플레이터와 영상기반 로봇 제어기와의 통합 연구를 통해 비강 자동 검체 채취 로봇의 검체 정확성 및 신뢰성을 높이기 위한 연구를 추가 수행 예정이다.

References

- [1] A. M. Lerner, G. K. Folkers, and A. S. Fauci, "Preventing the Spread of SARS-CoV-2 With Masks and Other "Low-tech" Interventions," *JAMA*, vol. 324, no. 19, pp. 1935-1936, Oct., 2020, DOI: 10.1001/jama.2020.21946.
- [2] S. M. Moghadas, M. C. Fitzpatrick, P. Sah, A. Pandey, A. Shoukat, B. H. Singer, and A. P. Galvani, "The implications of silent transmission for the control of COVID-19 outbreaks," *PNAS*, vol. 117, no. 30, pp. 17513-17515, Jul., 2020, DOI: 10.1073/pnas.2008373117.
- [3] I. W. Pray, L. Ford, D. Cole, C. Lee, J. P. Bigouette, G. R. Abedi, D. Bushman, M. J. Delahoy, D. Currie, B. Cherney, M. Kirby, G. Fajardo, M. Caudill, K. Langolf, J. Kahrs, P. Kelly, C. Pitts, A. Lim, N. Aulik, A. Tamin, J. L. Harcourt, K. Queen, J. Zhang, B. Whitaker, H. Browne, M. Medrzycki, P. Shewmaker, J. Folster, B. Bankamp, M. D. Bowen, N. J. Thornburg, K. Goffard, B. Limbago, A. Bateman, J. E. Tate, D. Gieryn, H. L. Kirking, R. Westergaard, and M. Killerby, "Performance of an antigen-based test for asymptomatic and symptomatic SARS-CoV-2 testing at two university campuses—Wisconsin, September–October 2020," *Morbidity and Mortality Weekly Report*, vol. 69, no. 5152, DOI: 10.15585/mmwr.mm695152a3.
- [4] D. Lieberman, D. Lieberman, A. Shimoni, A. Keren-Naus, R. Steinberg, and Y. Shemer-Avni, "Identification of respiratory viruses in adults: nasopharyngeal versus oropharyngeal sampling," *Journal of clinical microbiology*, vol. 47, no. 11, pp. 3439-3443, 2009, DOI: 10.1128/JCM.00886-09.
- [5] H. Jin, L. Liu, Y. Li, C. Chen, and Q. Fu, "Influence of different protection levels of PPE on nurses' physical fatigue during the COVID-19 pandemic," *Work*, vol. 72, no. 4, pp. 1143-1152,

2022, DOI: 10.3233/WOR-220025.

[6] S. Atay and S. Ü. Cura, "Problems encountered by nurses due to the use of personal protective equipment during the coronavirus pandemic: results of a survey," *Wound Manag Prev*, vol. 66, no. 10, pp. 12-16, 2020, [Online], <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33048827/>.

[7] J. Seo, S. Shim, H. Park, J. Baek, J. H. Cho, and N.-H. Kim, "Development of robot-assisted untact swab sampling system for upper respiratory disease," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 21, p. 7707, 2020, DOI: 10.3390/app10217707.

[8] Y. Hu, J. Li, Y. Chen, Q. Wang, C. Chi, H. Zhang, Q. Gao, Y. Lan, Z. Li, Z. Mu, Z. Sun, and A. Knoll, "Design and control of a highly redundant rigid-flexible coupling robot to assist the COVID-19 oropharyngeal-swab sampling," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 2, pp. 1856-1863, 2021, DOI: 10.1109/LRA.2021.3062336.

[9] LifeLine Robotics. World's First Automatic Swab Robot., [Online], <https://www.lifelinrobotics.com/>, Accessed: Oct. 21, 2020.

[10] Size Korea, [Online], <https://sizekorea.kr/>, Accessed: Nov. 7, 2021.

[11] C.-Y. Maeng, J. Yoon, D.-Y. Kim, J. Lee, and Y.-J. Kim, "Development of an Inherently Safe Nasopharyngeal Swab Sampling Robot Using a Force Restriction Mechanism," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, no. 4, pp. 11150-11157, 2022, DOI: 10.1109/LRA.2022.3187499.

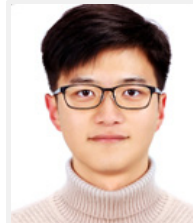
[12] C. Park, I. Choi, J. Roh, S. Y. Lim, S.-H. Kim, J. Lee, and S. Yang, "Evaluation of Applied Force During Nasopharyngeal Swab Sampling Using Handheld Sensorized Instrument," *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Mexico, 2021*, DOI: 10.1109/EMBC46164.2021.9629916.



이 종 복

2017 국민대학교 기계시스템공학부(학사)
2021~현재 고려대학교 기계공학과(석사)

관심분야: Healthcare robot, Wearable robot, Medical robot, Robot mechanism design



김 상 도

2015~현재 서울과학기술대학교 기계자동차공학부(학사)

관심분야: Robot mechanism design and control



김 호 빈

2021 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과(학사)
2021~현재 고려대학교 기계공학과(석사)

관심분야: Wearable robot, Health care robotics, Robot control



이 호 석

2019~현재 광운대학교 로봇학부(학사)

관심분야: Robot mechanism design and control



김 선 우

2021 광운대학교 로봇학부(학사)
2022~현재 고려대학교 전자전기공학부(석사)

관심분야: Wearable robot, Health care robotics, Embedded system



김 용 재

2003 한국과학기술원 전기전자공학(박사)
2011 삼성전자 생산기술연구소 수석연구원
2011 MIT 방문연구원
2013 삼성전자 종합기술원 전문연구원
2014~현재 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 부교수

관심분야: Electromechanical design, Control of hyper-redundant robots, soft wearable robots, Humanoid robots for physical human-machine interaction



박 신 석

1999 MIT 기계공학 박사
2000 Nissan 자동차 방문연구원
2002 Harvard 대학교 Postdoctor
2004 Keio 대학교 방문 교수
2011 Harvard 의대 방문교수
2004~현재 고려대 기계공학부 교수

관심분야: Robot Manipulator, Haptics/Force Feedback, Augmented Reality, Human-Machine Interface, Human-Machine Interface, EMG - FES System



이 종 원

2005 POSTECH 기계공학과(학사)
2007 POSTECH 기계공학과(석사)
2012 POSTECH 기계공학과(박사)
2020 삼성종합기술원 책임연구원
2020~현재 한국과학기술연구원 선임연구원

관심분야: Wearable Robot, Rehabilitation Robot, Robot Mechanism Design