

창의적 시스템 구현 I (18S) 최종보고서

20150748 최민우 (Team IKOH, 9조)

Timeline에 따라 우리 팀의 Progress와 내가 참여한 부분, 문제를 돌파했던 방법을 정리해 보았다.

1. Preparing for the 1st Design Review (3월 30일)

- 개강부터 3월 14일까지는 주어진 문제(미션) 이전에 우리가 각자 맡은 네 파트의 역할에 대한 이해가 필요했다. 그래서 첫 번째 정기 조모임(3/6)에서 정해진 각자의 분야에 대한 사전 조사를 실시했다. 나는 LabVIEW 파트를 맡았고, National instruments사 홈페이지 및 구글링을 통하여 랩뷰라는 프로그램이 어떤 작업을 수행할 수 있는지에 대해 주로 조사하였다. 이와 별개로 이때부터 한 달여간 파트 별 교육 및 실습 시간이 있었고 랩뷰 파트에서는 Assignment가 이 주 간격으로 세 개 주어졌다. 그중 첫 번째 Assignment의 Due였던 3월 16일에 두 번째 정기 조모임을 가졌다. 이 때 교수님과 조교님의 참관 아래에서 각 네 파트가 조사한 내용을 정리하여 발표하였고 조원 간에 정보를 공유하였다. 이렇게 파트 각각의 기능은 이해했지만 네 파트가 어떤 식으로 연결되는 지에 대한 완전한 이해는 부딪히며 차차 깨우치기로 했다.

- 우리가 만들어낼 시스템이 어떻게 미션의 가장 Crucial한 부분인 '공 집기'를 수행할 지에 대해 구상해야 했다. 3월 16일의 조모임을 끝내며 창의성이 돋보이면서 공을 정확하고 빠르게 집을 수 있는 'Ball Picking Mechanism'에 대해 다음 조모임(20일)까지 각 조원이 하나씩 아이디어를 만들어 오기로 하였다. 그리하여 조원들은 일주일간 아이디어가 떠오를 때마다 스케치를 하고 나름의 Evaluation을 거쳐 자신의 Best idea를 카톡방에 공유하였다. 그리고 20일 세 번째 정기 조모임에서 이 여덟 개의 아이디어가 교수님과 조교님 앞에서 공유되었다. 이 아이디어들에 대해 다 함께 분류 작업(오른쪽 사진)을 진행하였고 그 다음 창의성과 정확성, 신속성의 세 가지 평가 기준을 통해 어떤 아이디어를 채택할지 오랜 시간 논의되었다.

공 집는 방식					
아이디어 #	클러잡기	찍어서붙잡기	컨베이어벨트	나선구조	그물로 포획
1		○			
2	○				
3			○		
4				○	
5		○			
6		○			
7		○			
8	○				
9		○			
10					○

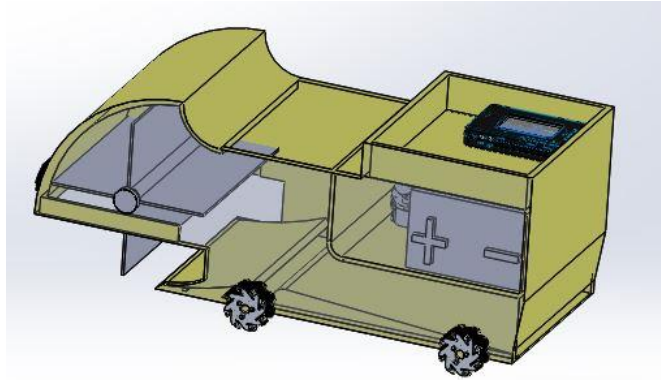
공 저장 방식			
아이디어 #	길다란 통형태	바구니	3개입 케이스
1			○
2	○		
3	○		
4	○		
5	○		
6	○		
7	○		
8		○	
9	○		
10			○

(긴 통의 경우)일방통행시키는 방법		공을 Release 하는 방법
아이디어 #		아이디어#
2	닫고 열수 있는 Stopper (판)	1 구조물에 밀려나게 함
3	컨베이어 벨트의 마찰력	2 칸막이를 엮
4	나선구조와 벽면	3 컨베이어벨트를 진행시킴
5	고무줄 들어간 전 형태 (팔도시)	4 나선구조의 회전을 진행시킴
6	입구부분의 고무	5 통을 뒤집어 반대편으로
7	입구부분의 스펀지	6 막대기로 밀어냄
9	입구부분의 스프링	7 통을 뒤집어 반대편으로
10	원통그물의 장력	8
		9
		10 그물 장력을 줄임

다. (이 시간이 세 달간의 프로젝트와 최종 점수에 극적인 영향을 미쳤다.) 여기서 우리는 창의성은 다른 부분에서 챙기기로 하고 정확성 및 신속성, 낮은 에너지 소모(이것이 낮은 최종 온도로 이어질 것이라 생각함)에 더 큰 배점을 두었다. 그런 기준에 기반한 정성적 평가 끝에 시스템 전면부에 달린 롤러를 회전시키며 공을 향해 진행, 롤러의 Blade가 공을 쳐서 시스템 안으로 들어 보내는 mechanism을 채택했다. 이후 공을 pick 할 방법 뿐 아니라 release할 방법에 대한 논의가 밤까지 진행되었고, 러프한 초기 컨셉을 완성했다. (다음 페이지 상단 사진)

이 초기 컨셉을 Solidworks를 통해 그려내는 것 또한 많은 노력이 필요했다.

- 우리는 우리 1st design review 발표에서 조원들의 다양한 디자인 가운데 롤러로 공을 잡는 메커니즘을 채택한 논리, 그리고 그것이 오른쪽 그림까지 발전해 나간 흐름을 설명하기로 하였다. 그를 위해 우린 채택 이전으로 되돌아가 디자인 후보군에 대해

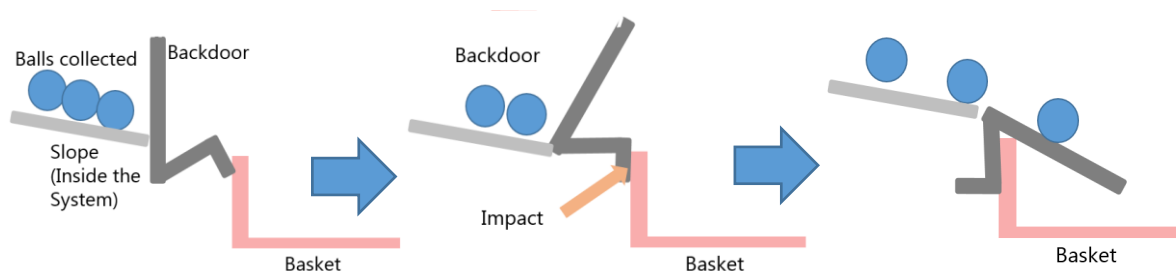


해 Pugh's Decision Matrix를 구성하였고, 체계적인 평가 기준을 마련해 아이디어들을 채점하였으며 이를 통해 같은 결론(우리의 디자인을 선택)에 다다른 논리 흐름을 완성하였다.

Pugh's Decision Matrix의 다섯 가지 평가 기준: Overall Operation Speed / Energy consumption / Robustness for picking up / Control Difficulty / Manufacture cost

- 발표 준비가 진행되는 동시에 LabVIEW 담당으로써 LabVIEW의 기본 문법과 사용법에 대해 배포된 Material, Sample code 및 학과에서 준비해주신 NI 직원 분의 직강, 그리고 랩뷰의 Help function(사실상 가장 많은 도움을 받았다)을 통해 배워 나갔다. 그를 간단히 적용하는 것이 Assignment 1 및 2였다. 마지막 Assignment 3은 MyRio가 수신 코드를 통해 PC의 송신 코드로부터 무선으로 신호를 수신하여 MyRio에 연결된 모터 PC의 커맨드에 따라 구동시키는 것이었다. 난이도가 갑자기 올라간데다, 예제 코드가 너무 Comprehensive하여 많은 LabVIEW 파트 학생들이 그를 해석하는데 애를 먹었고, 우리 LabVIEW 팀도 조교님의 심층적인 도움을 받아 이 과정을 이해하고 따라갈 수 있었다. 프로젝트 파일을 열어 수신 코드와 송신 코드 VI 파일을 각각 PC와 MyRio에 로드 시켜야 한다는 사실을 깨닫는 데 정말 오래 걸렸다.

- Collect했던 공을 바구니에 Release할 때 별도의 Actuator를 이용하지 않는 창의적인 mechanism을 내가 단독으로 구상하였다. 이는 곧바로 우리 System에 채택되어 이를 발표에 포함시켰다. 이 'Non-actuator ball Releasing Mechanism'은 최종 발표 때까지 우리 조만의 Genuine한 아이디어로 인정받았다. System 뒤쪽을 막아 공을 가두고 있던 문을 열면 공이 내부의 Slope를 따라 자연스레 바구니로 떨어지게 된다. 이 문(Backdoor)을 여는 방법은 별도의 Actuator를 이용하는 것이 아니라, System이 바구니를 향해 후진하며 바구니의 턱(Threshold)이 Backdoor의 하단부에 충격을 주면 Backdoor가 열리는 방식이다. (아래 그림)



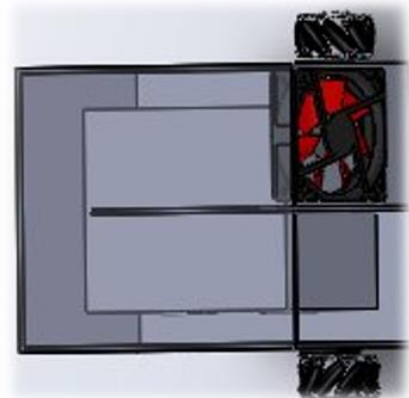
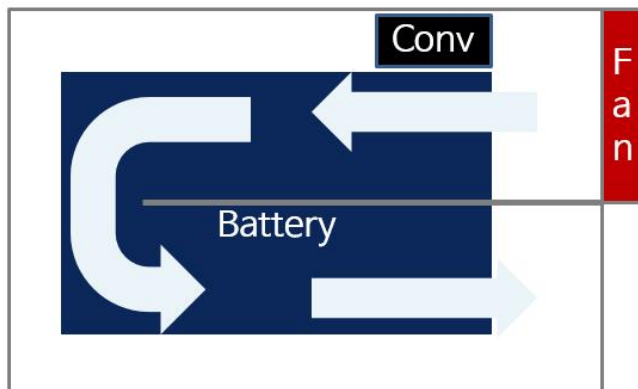
2. Preparing for the 2nd Design Review (5월 4일)

- 1st Design Review 후 진행된 다섯 번째 정기조모임에서는 곧바로 2nd Design Review까지 우리 조가 달성해야 할 목표를 설정했다. 그 목표는 바로 Hardware Prototype을 제작하고 비전인식, 랩뷰, ROS의 Interaction을 실시하여 '공이 코앞에 놓이면 똑바로 전진해서 공을 Collect 하는 System'을 구현하는 것이었다. Solidworks로 그린 조악한 디자인 하나만 수중에 있는 상태에서 설정한 5주 기한의 목표(그것도 중간고사 기간을 끼고)로써는 상당히 대담한 목표였다.

- 각 파트별 단기 목표가 설정되었다. LabVIEW 파트는 X-box 컨트롤러를 통해 모터 네 개를 동시에 각각 원하는 속도로 컨트롤 하는 코드를 구현하기로 했다. 또한 상대적으로 할 일이 적은 랩뷰 파트의 두 명이 짬어져 각각 하드웨어(Solidworks 팀)파트와 소프트웨어(ROS+비전)파트의 일을 병행하기로 하였다. 나는 하드웨어 파트에 합류하였고, 이후 할 일이 웬만큼 마무리된 랩뷰 파트보다도 하드웨어 파트에 많은 시간과 노력을 들이게 된다.

- 우리의 하드웨어는 앞서 그랬던 Solidworks 모델과 기본 구성은 같이 하지만, 20mm 프로파일로 뼈대를 구성한 후 나머지 부품들이 프로파일 뼈대에 부착되도록 했다. 다이내믹셀(Actuator)을 브라켓을 통해 뼈대에 단단히 체결한 후 메카닉 휠을 다이내믹셀 축에 연결하여 구동계를 구성하였다. 그리고 Solidworks로 설계하고 3D 프린터로 출력한 각종 부품들(Slope, Backdoor, Ball collecting fan)을 달아 Prototype을 구성하였다. Converter는 12V 및 15V 출력 두 개를 각각 하나씩 사용하기로 하였고(NUC을 15V로 구동) 이를 비롯한 회로 구성 부분은 Solidworks 담당하던 조원의 능력으로 기판 하나에 모든 납땜을 완료할 수 있었고 컴팩트한 회로를 완성하였다.

- 이 단계에서 Heat management에 관해 본격적으로 논의되기 시작했다. 나는 미션 수행 후 차체의 최대 온도를 측정하는 '에너지 미션'에 있어 선입견을 가지고 말았다. 그것은 전체 차체에서 배터리의 온도가 가장 높게 치솟을 것이라는 예상이었다. 그리하여 직육면체 배터리를 둘러 U자로 공기를 순환시켜 강제대류로 배터리의 모든 면을 식힐 수 있는 덕트를 설계하였다. (아래 그림) 하나의 쿨링 팬(PC 튜닝용 제품)으로 많은 Surface를 cooling할 수 있는 Temperatur management solution으로써 2nd design review에서 제시되었다.



- 차체가 설계되는 사이 4월 13일, 랩뷰 파트에서는 많은 시행착오 끝에 (TCP Read 함수를 하나로 단순화시키고, 클러스터의 구성 성분 타입을 SGL로 설정 후 Read 바이트 수를 96으로, 루프의 시간 딜레이를 10ms으로 설정하였음) NUC과의 통신으로 받은 데이터를 네 모터의 구동 속력 값으로 변환하여 명령을 내릴 수 있게 되었다. 차체가 전,후,좌,우로 움직이는 모션을 구현하였다.

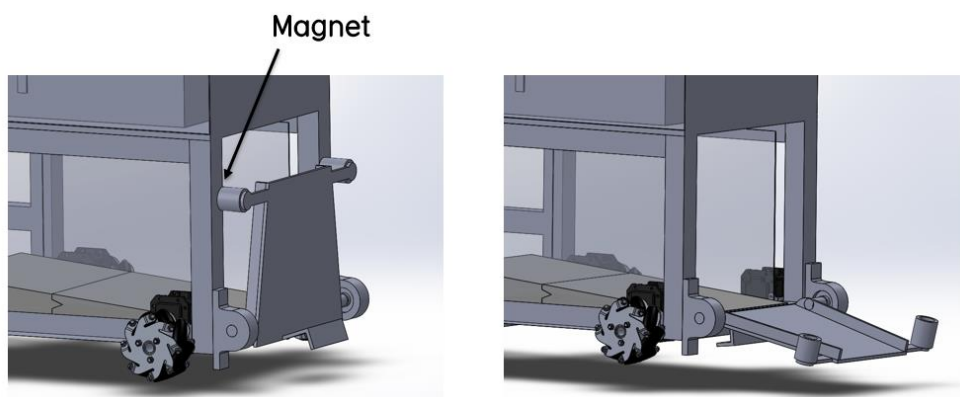
- 중간고사 기간을 거쳐 4월 22일, 차체 프레임 조립이 완료되었고 다이내믹셀과 메카넘 휠을 고정한 후 배터리, MyRio, PMS(Converter를 포함한 회로기판)만 올려 차체의 구동 파트를 완성하였다. 4월 23일 Xbox controller를 이용하여 System이 전후좌우로 움직이는 것을 확인하였다. 그러나 좌 좌우로 움직일 때 차체의 오리엔테이션이 그대로 유지되지 않고 틀어지는 것을 관찰했다. Mechanum wheel이 정상적으로 작동하기 위해서는 까다로운 조건이 필요함을 확인했다. 네 바퀴가 모두 땅에 비슷한 힘으로 접촉되어 있어야 하는데(서스펜션을 통해), 우리의 System은 프레임에 모터가 단단히 고정되어 있는 형태로, 지면의 미세한 굴곡에도 민감하게 반응하게 되었다. 우리는 이 문제를 모터의 높이가 균일하지 못했기 때문이라고 오판하였고(서스펜션이 필요함을 너무 늦게 인식하였음), 높이를 맞춰도 해결되지 않자 결국 좌우 모션을 최종 Demo 때에는 이용하지 않게 되었다. (제자리 회전 및 직진만 이용)

- 4월 28일, 전체 미션을 수행할 알고리즘의 초안을 구성하기 위한 회의가 진행되었다. 가능한 많은 조원이 모여 높은 점수를 받기 위해 우리의 로봇이 가져야 할 논리를 Risk-based design 방식의 접근을 통해 구성하였다. 그 결과 초안 알고리즘이 완성되었다.

- Ball collecting fan을 구동할 모터를 구매하였다. 토크 스펙은 더 낮고 최대 속력이 더 높은 MX-12W를 채택하여 차체에 조립하였다.

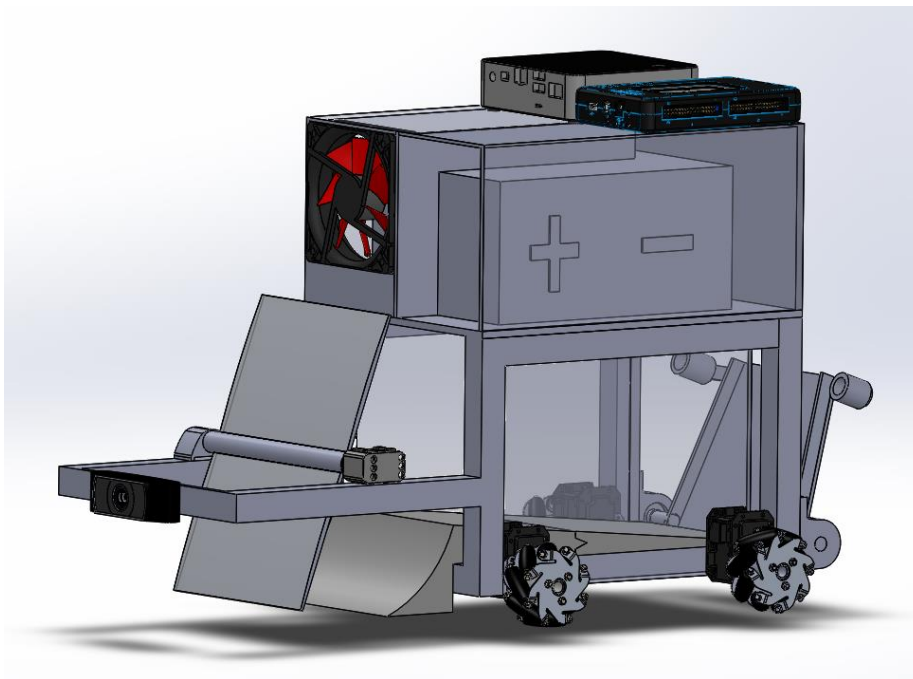
- 5월 1일 까지 몇 차례 Modification(설계 및 출력, 테스트)을 거친 Ball collecting fan의 2차 발표용 버전이 완성되었고, 그후 나는 Backdoor의 상세 설계를 단독으로 진행했다. 아래 여섯 개의 Constraint에 맞춰 Solidworks로 설계를 진행하였다. (아래 그림)

Constraints: i-바구니의 턱에 걸려 문이 열리도록 페달부가 있어야 하고, ii-문이 열릴 때 페달부가 바닥에 접촉하지 않아야 하며, iii-문이 완전히 열렸을 때 상단부가 바구니 바닥에 닿으면서 Stopper역할을 하고, iv- 하단부는 차체의 Slope와 매끄럽게 연결되어야 하고, v-차체가 다시 전진하기 전까지 문이 열린 상태를 유지해야 하고, vi-차체 주행 중에는 문이 열리지 않아야 함.



- 5월 2일 3T 투명 아크릴 판자를 글루건으로 조립하여 cooling duct를 제작하기 시작했다. 이는 다음날 마무리되었으며, cooling fan을 회로에 연결하여 Cooling system을 구동하는 데 성공하였다. 또한 Ball collecting fan및 Backdoor가 출력되어 차체에 조립되었다. Ball collecting fan과 Slope 사이 양 옆에 아크릴로 칸막이를 설치하였다. 이로써 2차 발표를 위한 차체가 개략적으로 완성되었다. (아래 설계상 구상도)

- 5월 3일, Hubo Lab에서 차체 구동 후 열화상 카메라로 촬영을 진행하였고, 각 부품 별 온도 상승이 도출되었고, 이 때 배터리의 온도 상승이 전혀 없고 Converter 및 MyRio의 온도가 가장 높게 상승한다는 사실을 확인하였다. 따라서 Converter 및 MyRio의 Cooling에 집중해야 할 필요가 있다고 보고 2nd Design Review 이후 새로운 Duct를 제작하기로 하였다.



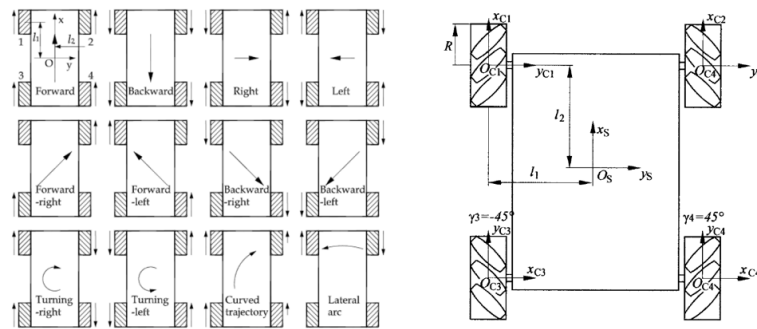
- 소프트웨어 팀에서는 2차 발표까지의 목표였던 '공을 웹캠으로 인식하면 System이 전진하여 공을 Collect'하는 알고리즘을 구현하는 데 성공하였다. 나아가 앞에 장애물(빨간색 공)이 있을 때 회피하는 기동도 '45도 제자리 회전-직진-45도 반대로 회전-피했는지 확인-더 피해야 한다면 다시 반복'의 다소 비효율적이지만 구현에 성공했다.

3. Preparing Final Presentation and Demo (6월 1일)

- 메카넘 휠을 구동하는 기본 제공 다이내믹셀의 최대 속력이 너무 낮아서 결국 System의 속도가 너무 느린 문제를 해결하고자 시도했다. 논의 끝에 결론은 더 큰 메카넘 휠을 구매하여, 같은 각 속도에서 더 큰 선속도를 낼 수 있도록 하는 것이었다. 그리하여 기존의 60mm 지름 메카넘 휠의 2.5배 크기인 152mm지름의 메카넘 휠을 구매하였다. 이를 다이내믹셀에 부착하기 위한 전용 허브도 같이 구매하였으나, 기존 메카넘 휠을 연결하던 Dinamixel의 부속 허브와의 연결을 위해 선반, 밀링, 드릴링의 가공 과정을 거쳐야 했다. 모터의 프레임 부착 위치를 올려서 차체 프레임의 높이 변화는 일어나지 않도록 했다. (Ball collecting fan및 Backdoor의 기존 작동이 유지될 수 있도록

- Big mechnum wheel을 이용해 차체를 구동하자 다이내믹셀 내부의 구동축에 마모로 인한 유격이 생겨 바퀴가 흔들렸고, 차체 무게로 인한 다이내믹셀(이 연결된 브라켓의) 틀어짐이 생겼다. 후자는 차체 프로파일과와 다이내믹셀 사이를 단단히 연결할 수 있는(상대 운동의 자유도를 줄일 수 있는) 너클을 설계하여 해결하였다.

- Big mechnum wheel에는 Critical한 문제가 있었다. 우리 차체에 비해 너무 비대한 사이즈의 바퀴로 인해 메카넘 휠의 구동에 따른 차체의 움직임을 계산하는 식(Wheel Kinematics, 아래 사진)에 오차(방향성 없는 노이즈)가 지속적으로 발생한 것이다. (두 메카넘 휠 사이 간격이 지름의 1/5도 안될 정도로 좁았음) 이는 차체를 180도 회전(마지막에 Ball release를 위해)하라고 명령을 내렸을 때 170도에서 190도 사이의 랜덤한 값으로 차체가 회전하는 심각한 문제를 야기했다.



$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{R}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ -\frac{1}{l_1+l_2} & \frac{1}{l_1+l_2} & -\frac{1}{l_1+l_2} & \frac{1}{l_1+l_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{Inverse matrix}} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(l_1+l_2) \\ 1 & -1 & l_1+l_2 \\ 1 & -1 & -(l_1+l_2) \\ 1 & 1 & l_1+l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix}$$

- 옆친 데 똥친 격으로, 큰 바퀴를 사용하여 속력을 증가시킨 Group에 대해서 일종의 페널티 (기어 등 다른 방법으로 속력을 증가시킨 조들을 더 높게 평가할 것이라는 예고)가 예고되었다. 이는 우리의 의욕을 완전히 꺾었고, 위의 Noise 문제를 해결하려는 긴 시도 끝에 결국 Big mechnum wheel 사용을 포기하고 다시 작은 바퀴로 되돌아갔다. 이미 속력 증가를 위한 다른 방법을 시도할 만한 시간은 남지 않은 시점이었다. (5월27일)

- 앞선 온도 측정 결과 Energy mission을 위해 우리의 Duct를 완전히 새로 만들기로 하였다. 이는 배터리의 쿨링은 전혀 필요 없고 Converter 및 MyRio의 쿨링에 집중해야 했기 때문이다. 설계의 흐름은 다음과 같았다.

i-12V,15V 두 컨버터(및 기판)를 각각 cpu cooling fan(Heat pipe 및 Heat exchanger, Fan으로 구성된)에 Thermal grease를 발라 부착함으로써 컨버터 온도를 최대한 낮춤. 이때 두 fan은 바람을 Duct의 상단으로 빼내는 방향 (뜨거운 공기는 위로 올라가므로)

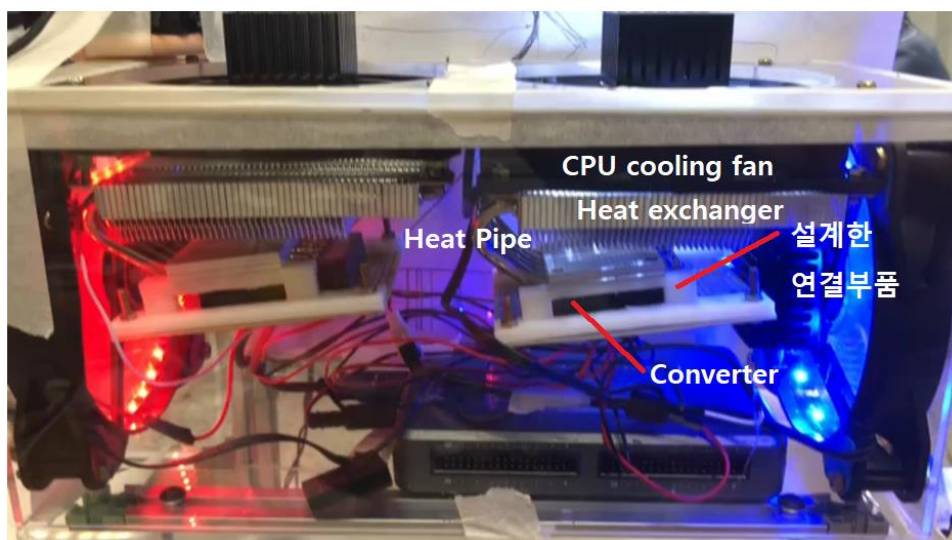
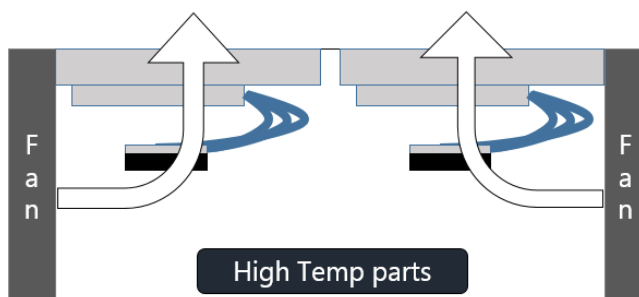
ii-공기 흐름의 Minor loss를 최소화 하기 위해 일자형 덕트를 구성하고, 양쪽 끝으로 유동이 들어와 천장 부분의 CPU fan에 의해 나가는 흐름으로 구성

iii-Duct 양쪽에는 유량을 높이기 위해 이전 Duct에 달았던 것과 같은 cooling fan을 부착

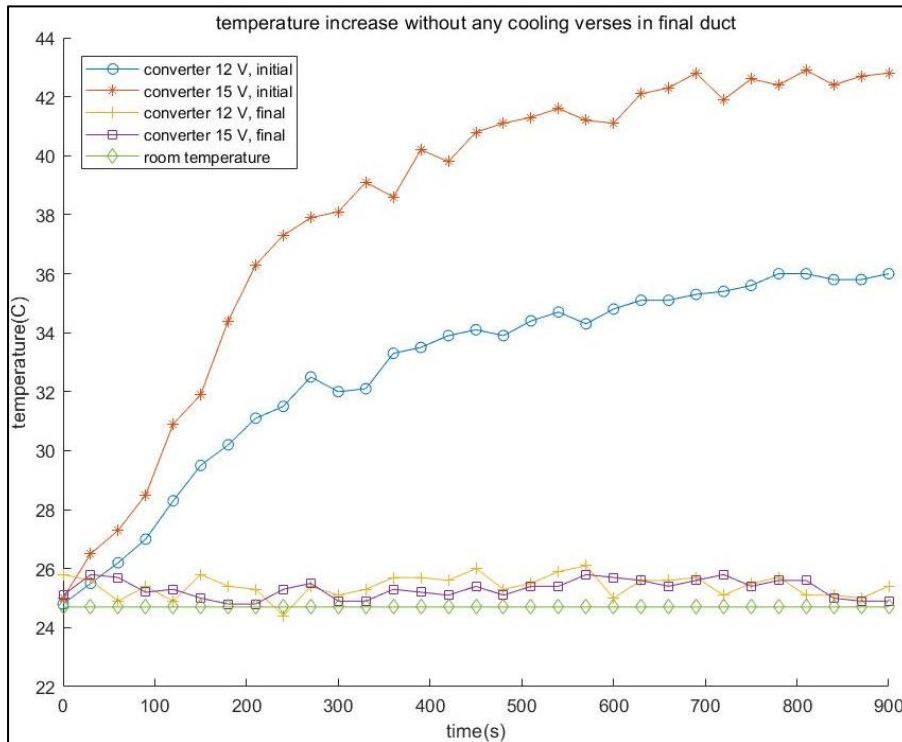
iv-덕트 내부에는 Thermal pad와 함께 부착한 MyRio를 배치 (Fin 끝단을 통해 덕트 바닥에 접촉하여 공중에 MyRio가 떠 있는 형태)

5월 16일 설계를 완료하여 아크릴판을 주문했고, 24일에 수령하여 마스킹 테이프(분해와 재조립이 용이)로 조립 및 4개의 fan 납땜을 완료했다. 아래는 모식도와 실제 구현된 Cooling duct이다.

Converter가 납땜 된 보드의 구멍과 CPU cooling fan의 CPU 접촉부 주변의 구멍을 연결하는 부품을 직접 설계하여 출력(아래 사진에 표시)하였다. Fan의 중앙부에도 발열이 있어 MyRio 밑에 지지 역할을 하던 Fin을 네 Fan의 중앙부로 이동시켜 부착했다..



- 새 Cooling duct의 효과는 굉장했다. (아래 그래프) Converter의 온도가 공기의 온도(Room temperature)보다 불과 1~2도 가량 높은 온도에 머물렀다. 그리고 Duct 양 옆의 (빨강,파랑색) Cooling Fan이 굳이 필요한지에 대해서도 테스트 한 결과 유동량이 증가하여 온도를 더욱 낮춰주는 효과가 있었다.(양쪽 fan이 없어지자 3~4도의 온도 상승을 보여줌)



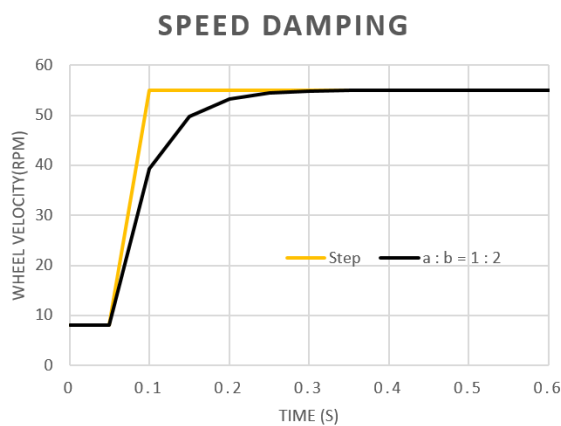
- 소프트웨어 부문에서는 4월 28일 구상 이후 꾸준히 Modify 해온 알고리즘을 차체를 통해 테스트 하는 길고 지루한 과정이 이어졌다. 바퀴를 작은 것으로 되돌림으로써 낮은 속도를 안고 갈 수 밖에 없게 되자, 다양한 공 배치에 대해서 최대한 Robust하게 공을 Collect 하는 알고리즘을 구현하고자 했다. 주위서는 안될 공을 줍거나, 공이 웹캠의 사각지대에 놓이는 상황이 Collecting 하는 부분에서는 가장 큰 문제였고, Troubleshooting 방식으로 꾸준히 알고리즘을 개선해 나갔다.

기본 ball picking algorithm은 다음과 같다: 웹캠에서 가장 오른쪽에 보이는 파란공을 주우러 가며, 그 경로에 빨간 공이 있을 경우 왼쪽,오른쪽 중 더 이동거리가 적은 방향으로 차체가 회전, 일정 거리 직진, 반대로 회전 하는 방식으로 회피하게 된다. 파란 공이 차체의 중심선과 일직선에 놓이도록 하며 다가가다가 일정 거리까지 가까워지면 Ball collecting fan을 돌리며 일정 시간만큼 전진하여 ball을 pick up한다. 다음 파란공을 찾으면 이를 반복하며, 세 번 공을 주웠다고 판단하면 마지막으로 360도 회전하며 놓친 파란 공이 없는지 탐색한다.(있다면 위 알고리즘을 반복) 이제 공을 Release하러 이동한다. Releasing하는 부분에서는 초록색 공을 인식하여 바구니 근처까지 이동해서 바구니 옆에 달린 두 개의 초록색 공과 차체의 Align을 맞춘 후 180도 회전 후 후진하여 공을 Release 하였다. Align을 맞추는 과정에서 좌우 Shifting 모션이 다시 필요해졌고 우리의 system은 여전히 부정확한 움직임을 보여줬지만, 맞을 때까지 지속적으로 보정해주는 Feedback control을 적용하여 Align을 맞출 수 있었다.

- 가까운 공부터 쏘는 것이 아니라 오른 쪽 공부터 쏘는 이유는 공 하나를 주운 뒤 다음 공을 찾을 때 무조건 system의 왼쪽 방향만 찾으면 되기 때문에 시간을 절약할 수 있기 때문, 그리고 상대적으로 멀리 떨어진(3~4m 이상) 공의 거리(크기로부터 추산)를 정확히 측정하기 어려웠기 때문이다.

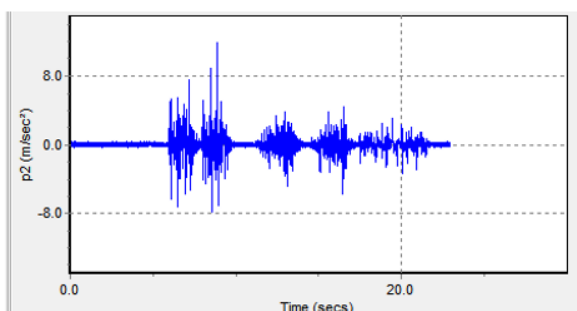
- 공동강의실의 조명 아래에서 Open CV의 HSV(인식할 색상값)을 보정하였고 알고리즘을 수정하는 동시에 공을 놓치지 않고 Collect 할 수 있는 최적의 속도값을 찾아내는 데 노력했다. Ball collecting fan 모터(MW-12W)의 속력을 3으로 설정했을 때 공이 가장 잘 Collect 되었다.

- 진동 문제에 관해서 우리 조는 웹캠의 흔들림이 실시간 영상 처리 및 인식에 미칠 영향을 주요한 문제로 봤다. (Suspension의 필요성은 네 바퀴의 효과적인 접지에도 있었지만 고려하지 않음) 그리고 이를 해결할 방법으로 소프트웨어적 방법과 하드웨어적 방법을 동시에 적용하였다.

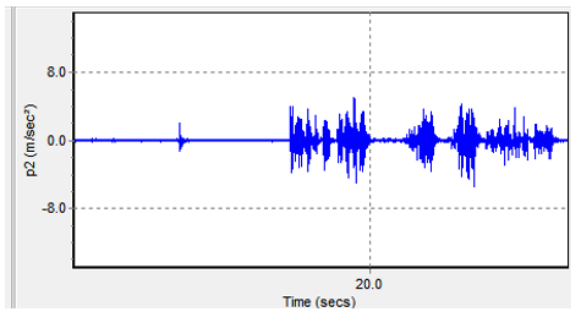


- 먼저 소프트웨어적 방법이란, 모터의 인풋 값을 smoothing하는 것이었다. (왼쪽 사진) 알고리즘 상에서 모터의 인풋이 변하면 왼쪽의 노란색 그래프처럼 step input에 가깝게 모터를 제어하게 되고 이는 차체의 순간적인 급가속 및 급제동을 가져와 진동 문제를 야기했다. 이에 기존의 Step input에 적절한 Cutoff Frequency를 가진 Low-pass filter를 씌워 모터 인풋을 검은 그래프처럼 Smoothing하였다.

- 하드웨어적 방법은 차체 프레임과 Webcam 사이에 Vibration isolator를 설치하는 것이었다. Webcam의 질량이 워낙 작아서 시중의 진동 저감 패드 등은 효과가 미미했고, 일상에서 찾을 수 있는 퍼프, 스펀지 등 다양한 재료에 대해 시험(지도교수님의 Active Lab에서 차체 구동 시의 최대 가속도를 측정)한 결과, 퍼프(화장용품)가 가장 Vibration isolation 효과가 뛰어난 것으로 판별되었다. (아래 퍼프 부착 전/후 웹캠의 가속도 그래프)



Cam&Car directly attached



Cam-Sponge-Car attached

(다음 페이지 최종 시스템 사진)

