Appendices

A. Graduation brief & planning

PROJECT TITLE, INTRODUCTION, PROBLEM DEFINITION and ASSIGNMENT
Complete all fields, keep information clear, specific and concise

Project title Smart shirt for upper body motion tracking in physiotherapy

Please state the title of your graduation project (above). Keep the title compact and simple. Do not use abbreviations. The remainder of this document allows you to define and clarify your graduation project.

Introduction

Describe the context of your project here; What is the domain in which your project takes place? Who are the main stakeholders and what interests are at stake? Describe the opportunities (and limitations) in this domain to better serve the stakeholder interests. (max 250 words)

Demand for healthcare professionals is increasing, and there is a growing emphasis on the development of innovative rehabilitation solutions to meet the needs of patients in the future. Physiotherapists have observed that patients frequently experience difficulties in maintaining the correct posture and steady breathing during exercises, which can slow down their recovery. Consequently, patients often return to the clinic for supervised exercises and take longer to recover, which puts further pressure on the healthcare system.
The field of smart textiles is rapidly evolving, which present opportunities for rehabilitation solutions. A smart shirt, which incorporates smart textiles and IMU sensors, could be a potential solution for patients with long-term injuries. It could accurately gather data on the movements a patient makes during their exercises. The data could then be used to enable patients to perform their exercises correctly and keep them motivated. Moreover, the technology provides physiotherapists with real-time data on which they can base the treatment plans for their patients, and thereby reducing the necessity for frequent in-clinic visits.
Although commercial smart shirts are effective at measuring body movements, they are generally inaccessible for home use due to their high costs and the complexity of their operation. The existing prototypes, such as the smart sensor tights for hamstring injury prevention (Steijlen et al., 2021), demonstrate potential. Similarly, a smart shirt prototype (Alamel et al., 2024) addressed motion tracking in physiotherapy, but encountered challenges with sensor integration and measurement accuracy.

Alamel, L., Brancusky, P., Dekker, M., Gilling, S., Niejenhuis, C., & Yaghoot, D. (2024). Smart shirt Design intervention for accessible motion tracking in physiotherapy.
Steijlen, A., Burgers, B., Wilmes, E., Bastemeijer, J., Bastiaansen, B., French, P., Bossche, A., & Jansen, K. (2021). Smart sensor tights: Movement tracking of the lower limbs in football. Wearable Technologies, 2.
https://doi.org/10.1017/wtc.2021.16

space available for images / figures on next page

image / figure 1 Smart shirt (Alamel et al., 2024) and tights (Steijlen et al., 2021)

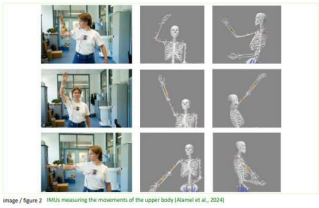


image / figure 2 IMUs measuring the movements of the upper body (Alamel et al., 2024)

DESIGN FOR our future

TU Delft

Personal Project Brief – IDE Master Graduation Project

Problem Definition

What problem do you want to solve in the context described in the introduction, and within the available time frame of 100 working days? (= Master Graduation Project of 30 EC). What opportunities do you see to create added value for the described stakeholders? Substantiate your choice.
(max 200 words)

The limitation with the current smart shirt prototype of Alamel et al. (2024) lies in the inability to reliably capture precise movement data and visualise these movements correctly, especially when sensors are integrated into the fabric.

This project aims to develop a proof-of-concept smart shirt capable of accurately measuring upper-body movements using embedded IMU sensors, with visualizations inspired by exomuscular skeletal structures to enhance data interpretation. This approach could provide physiotherapists with detailed, objective insights beyond standard assessments.

A smart shirt offers significant value for both patients and physiotherapists. For patients, it provides an accessible tool to monitor rehabilitation progress from home, with potential for engaging feedback features, like games or visual cues. For physiotherapists, it offers a reliable method of data collection for more targeted, data-driven treatment plans. Validating the shirt's accuracy in movement tracking could pave the way for a smart shirt that empowers patients in their recovery and supports healthcare professionals in delivering effective, personalized care.

Assignment

This is the most important part of the project brief because it will give a clear direction of what you are heading for. Formulate an assignment to yourself regarding what you expect to deliver as result at the end of your project. (1 sentence) As you graduate as an industrial design engineer, your assignment will start with a verb (Design/Investigate/Validate/Create), and you may use the given text format:

Create a working prototype to validate the use of a smart shirt with embedded IMU's to measure upperbody movements for patients with a long term injury, and their physiotherapists.

Then explain your project approach to carrying out your graduation project and what research and design methods you plan to use to generate your design solution (max 150 words)

This project will follow an iterative process, with a focus on physical prototyping informed by research. I will begin with literature research on smart textiles, IMU sensors and body movement tracking, along with a benchmark analysis of existing smart textiles. To gain insights into human upper-body movement tracking, I plan to conduct an interview with biomechanical engineering expert.

Based on initial research findings, I will explore with fast, parallel low-fidelity prototyping to experiment with smart textile integration. These will be followed by a high-fidelity prototype which can be iteratively adjusted to refine the final concept. User testing will provide feedback to guide the development and validate the solution. This will be a process of trial-and-error when bringing the hardware and software together in the smart shirt..

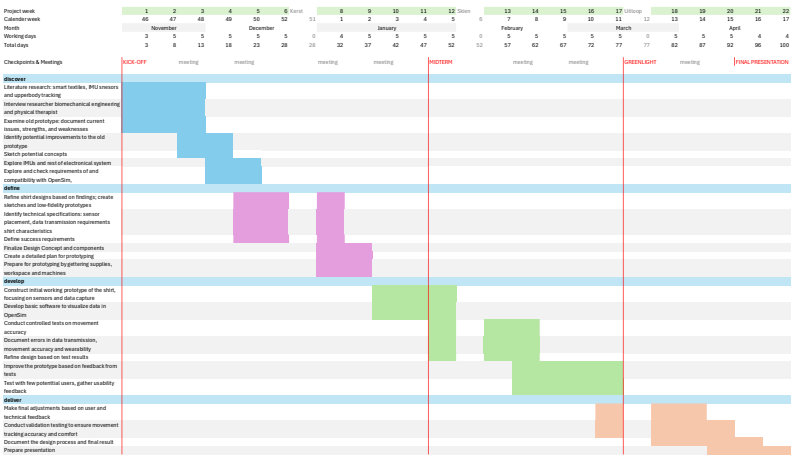
Motivation and personal ambitions

Explain why you wish to start this project, what competencies you want to prove or develop (e.g. competencies acquired in your MSc programme, electives, extra-curricular activities or other).

Optionally, describe whether you have some personal learning ambitions which you explicitly want to address in this project, on top of the learning objectives of the Graduation Project itself. You might think of e.g. acquiring in depth knowledge on a specific subject, broadening your competencies or experimenting with a specific tool or methodology. Personal learning ambitions are limited to a maximum number of five.
(200 words max)

I am excited to start this project, because it fits perfectly with my interests in combining design and engineering - an ideal fit with my background in mechanical engineering and my Masters in Integrated Product Design. Working with textiles and electronics allows me to showcase and develop my prototyping skills. The elective Fundamentals of Textile Systems and my participation in the IDE Academy Day on soft sensors have really excited me. I also enjoy sewing my own clothes and would like to use my skills in this project.

Through this project I would like to develop my skills in electronics and hardware. I would also like to develop my programming skills, particularly in integrating different components into a cohesive, intelligent system. Finally, I want to refine my ability to present both the process and the end result in a concise and convincing manner. These learning objectives will support my growth as a designer-engineer who can meet both technical and creative challenges, making this project a valuable step towards my professional ambitions.



B. Ideation of IMU integration

Open textile pockets. Pockets that allow easy extraction and insertion of the IMUs.

Closed textile pockets. Entirely sewing the IMUs into the shirt with additional fabric protection.

Velcro. Using Velcro strips to attach and detach the sensors as needed.

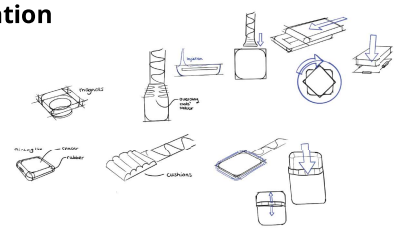
Click System. A mechanical click system for securing the IMUs in place.

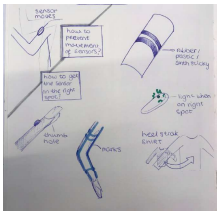
Printed cases. Utilizing 3D-printed cases to house the IMUs.

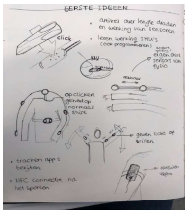
Encapsulation in Moulded Forms. Casting the IMUs in water-tight moulded forms.

Pogo Pins. Employing pogo pins for easy removal and secure placement.

Apple tag. Using a flexible half open case from which the sensor can be popped in and out.







C. Interviews

. Interview with previous smart shirt researcher

INTRODUCTIE (5 MINUTEN)
Om student op haar gemak te stellen en een overzicht te krijgen van het project.

1. Kun je een korte samenvatting geven van jullie project? Wat was het doel en wat hebben jullie bereikt? *Het doel was om data te verzamelen met shirt en dit te visualiseren maar ook rekening te houden met comfort, duurzaamheid, washability etc. Maar uiteindelijk hebben we ook veel werk gedaan in het bepalen van de user case.*

2. Hoe was de tijdsverdeling over de verschillende fases van het project (onderzoek, ontwerp, prototyping, testen)? *Eerste 10 weken vooral geprogrammeerd om de sensors werkende te krijgen tweede 10 weken meer gekeken naar de context, interviews met fysios, design van het shirt, testen van comfortability. Voor volgende keer zou ik in plaats van deze gescheiden manier meer parallel ontwerpen aangezien alle onderdelen met elkaar geintregeeerd zijn en dus veel invloed op elkaar hebben.*

3. Welke rol heb jij specifiek gehad binnen het team? *Vooral gewerkt aan de hardware en software, veel geprogrammeerd en met OpenSim gewerkt.*

DIEPTEVRAGEN (20 MINUTEN)
Proces en Ontwerpkeuzes
1. Wat waren de grootste uitdagingen tijdens het project, en hoe hebben jullie deze aangepakt? *Time management, gebrek aan ervaring met elektronica, de integratie van alle onderdelen aangezien er nog geen eerder prototype van het smart shirt was moest er op vele vlakken veel uitgezocht worden, bijvoorbeeld het beslissen op een specifieke targetgroep gat in de markt wat het shirt kan vullen*

2. Welke ontwerpkeuzes hebben jullie gemaakt die cruciaal waren voor het functioneren van het prototype? (Bijv.: doelgroep, materiaalkeuze, type sensoren, connectiviteit). *Voor doelgroep hebben we gekozen voor patienten bij de fysio specifiek met een schouder injury, eerst was de opdracht nog heel breed ieder zou in de toekomst een smart shirt dragen. We hadden hiervoor gekozen aangezien het niet "gezond" een goed idee is om in de toekomst alles te meten, alleen als er een duidelijk doel is zou men data moeten verzamelen van de specifieke bewegingen die een persoon maakt. Verder hebben we met de sensors veel uitgeprobeerd en onze keuze vooral laten bepalen door de sensoren die we werkende kregen en de prijs. We hadden gekozen het shirt zelf te maken zodat we daar onze eisen bijvoorbeeld aestheticwise of materiaalkeuzes op verschillende plekken konden aanpassen. Wilde niet zo maar decathlon shirt gebruiken en alles daarop naaien minderspectaculairrsaai. Nadeel was wel dat sommige onderdelen bij de ene persoon strak zat rond de armen en verder goed en bij de ander juist goed bij de armen en los bij de buik. Voordeel was dat voor het naaien van het circuit dat de stof nog "plat" was.*

3. Hoe hebben jullie inzichten bijvoorbeeld van fysiotherapie interviews geïntegreerd in het ontwerp? *Vooral dat schouderinjuries moeilijk te behandelen zijn. Verder was vooral de tweede meeting toen we al wat verder waren met het shirt ontwerp interessant aangezien toen meer duidelijk werd wat het doel en de werking van het shirt waren. Toen kregen we ook inzichten in dat het nuttig is om de sensoren los te kunnen koppelen van het shirt en er een product service system van te maken. Waar de physiotherapeut of revalidatiecentrum de sensoren heeft liggen en de patient zelf het shirt koopt.*

Technische Overwegingen
5.a. Kun je uitleggen hoe de hardware en software samenwerkten in het prototype? *Sensors verbonden met multiplexer, die verbonden met arduino. De arduino aangesloten op laptop met microusb kabel. Op laptop werd arduino code gerund voor het configureren van de sensoren en daarna voor het meten van de hoeken. Daarna werd dit met een pythoncode in een format opgeslagen. Deze twee bestanden (configuratie en hoeken) konden daarna op OpenSim geupload worden.*
5.b. Waar zaten er problemen met de integratie van sensoren en het circuit? En hoe zou je dit verbeteren? *Foute connecties waarschijnlijk waarom het uiteindelijk niks meetten.*

6.a. Jullie kozen voor USB-C om de sensoren aan te sluiten. Waarom? *We wilden graag dat de sensoren losgekoppeld konden worden om een product servicesystem te ondersteunen, voor washability en repairability. Hadden gezocht op washable connectors en toen deze gekozen omdat het een redelijk vaak gekozen aansluiting is.*
6.b. Zijn er technische problemen geweest met deze keuze? *Met het verbinden van de sensoren er achter gekomen dat conductive thread niet tegen hitte kan daarom uiteindelijk kleine metalen buisjes gebruikt om de verbinding te maken met de draden in het shirt. Wel een priegelwerk*
6.c. Zou je een andere optie aanraden, en waarom? *Er waren veel meer opties zou daar wel verder induiken als ik jou was hadden wij geen tijd meer voor.*

7.a. Waarom hebben jullie het circuit op het shirt genaaid in plaats van een rekbare strip te gebruiken? *Dacht dat dit de bedoeling was verder niet echt andere dingen uitgezocht*
7.b. Welke voor- en nadelen kwamen daarbij kijken? *Nadeel dat het shirt niet helemaal in elkaar kon maar dat je tussen door de geleidende draden op het shirt moet naaien.*

8.a. Waarom hebben jullie gekozen voor OpenSim als visualisatiehulpmiddel? *Dat werd ons aangeraden en hadden weinig tijd om iets anders uit te zoeken*
8.b.Werkte dit naar verwachting? *Zo niet, wat zou een alternatief kunnen zijn? Werkte prima, schalen was niet gelukt alleen totale lengte en gewicht van de user. Verder denk ik dat het mogelijk is om een python code te runnen terwijl het shirt gebruikt wordt inplaats van na de tijd alles op te loaden. Ik vond het programma verder fijn genoeg, toen ik het eenmaal door had. Verder moet je niet vergeten dat de namen in je eigen code dezelfde moeten zijn als in OpenSim zelf.*

Resultaten en Feedback
9. Welke resultaten waren het meest verrassend of opvallend?

10. Jullie eindprototype kreeg uiteindelijk geen resultaten van de bewegingsmetingen. Waar denk je dat het aan lag? False contact waarschijnlijk wel moeilijk te zeggen, kan echt heel veel zijn. Zou ook kunnen liggen aan de weerstand in de conductive thread hadden we niet getest. Maar de ground en power aansluiting waren wel gewoon goed.

Verbeterpunten
11. Als je opnieuw aan dit project zou beginnen, wat zou je anders doen? *Ja dus parallel werken, en dan meer stap voor stap opbouwen, jammer dat het uiteindelijk niet echt werkte.*

12. Hoe zou jij verder werken aan het prototype om het smart shirt beter te maken? (Bijv.: materiaalkeuze, sensoren, gebruiksgemak). *Meer onderzoek naar wat het shirt nou eigenlijk echt moet meten hoe precies, wat heeft de physio precies nodig. Zou erg interessant zijn om een creative session te doen met mensen die met het shirt zouden gaan werken. En meer user testen is het shirt comfortabel? Nu was het plasticlaagje wat de draden bedekte erg noticable Snapt de gebruiker wat hij of zij moet doen. Verder hoe kan je het softwaresysteem verbeteren, automatisch uploaden, realtime, etc. Integratie van de sensors en hoe lang gaat dit shirt nou echt mee, wat is zijn levensduur.*

AFSLUITING (5 MINUTEN)
1. Zijn er belangrijke inzichten die je nog niet hebt genoemd?

2. Heb je aanvullende documentatie, zoals tekeningen, codes, of testresultaten, die nuttig kunnen zijn? *Ik heb nog wel wat codes ik zal ze opsturen*

3. Wat zou je me aanraden om in gedachten te houden terwijl ik aan mijn eigen project werk? *Niet alles willen oplossen een deel is al een goeie stap en denk aan de user wees niet bang dat te volgen en niet wat je eerste idee was.*

SUMMARY
The previous smart shirt project aimed to collect and visualize movement data while considering comfort, durability, and washability. Much time was spent exploring the different sensors and defining the user case, with physiotherapy patients with shoulder injuries identified as the target group. This focused approach highlighted the importance of designing solutions for specific user needs in rehabilitation. Moreover, this makes making design choices easier.

Process Challenges and Recommendations:
• A linear workflow (first coding, then context exploration) limited integration. Parallel development is recommended to align hardware, software, and design components from the start.
• Time management was a major issue, compounded by limited experience with electronics and motion tracking systems.

Design and Technical Considerations:
• Sensors were chosen based on availability and cost. While USB-C connectors supported modularity for washing and repairs, connecting with conductive thread, first tried with heat shrinking material, was hard due to heat sensitivity, requiring alternative solutions like metal tubes for connections.
• Sewing circuits directly onto fabric allowed customizability but presented production and comfort issues. The noticeable plastic covering on conductive threads was uncomfortable for users. And the sewing of the conductive thread could only be done when the shirt was not yet sewn together.
• OpenSim was adequate for post-measurement visualization but real-time visualisation was not reached yet. Simplifying the software workflow by directly programming into OpenSim and ensuring compatibility between code and OpenSim naming conventions is crucial.

Learnings for Future Development:
• Greater attention to user experience and comfort is essential, including exploring ways to improve fit and reduce noticeable hardware.
• More testing is needed to validate measurement accuracy and ensure durability, particularly with conductive materials and sensor integration.
• Involving physiotherapists and patients in ideation through creative sessions could better align design features with their practical needs.

By focusing on a clear use case, integrating processes, and prioritizing user feedback, the next iteration of the smart shirt can achieve greater functionality and usability.

x.b. Interview with rehabilitation doctors

INTRODUCTIE (5 MINUTEN)
"Ik werk aan het ontwerpen van een smart shirt met geïntegreerde bewegingssensoren om bewegingen van het bovenlichaam te meten en mogelijk de data te visualiseren. De toepassing van dit shirt is om het in te zetten ter ondersteuning van revalidatie en fysiotherapie."

Laten zien van shirt en visualisatie. En het doel van het interview uitleggen.
"Het doel van deze sessie is om te begrijpen waar een smart shirt van waarde kan zijn binnen het revalidatieproces, verder welke eisen eraan het shirt gesteld moeten worden en welke functionaliteiten het nuttig maken voor zowel arts als patiënten."

Toestemming en Logistiek: *Vraag toestemming om het interview op te nemen en aantekeningen te maken. Leg kort uit hoe de sessie zal verlopen.*

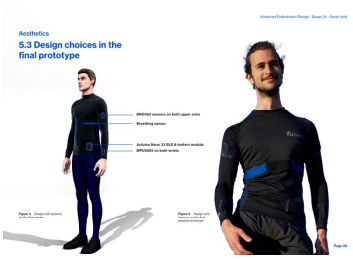


Figure 81. *Slide shown during interviews*

DISCUSSIE (25 MINUTEN)
DEEL A: KORT INZICHT IN HET REVALIDATIEPROCES (5 MINUTEN)
1. Overzicht van Revalidatie: *Zou u kort kunnen omschrijven hoe een revalidatieproces er uit ziet voor patiënten met klachten aan het bovenlichaam?*

2. Huidige Hulpmiddelen en Uitdagingen: *Welke hulpmiddelen of methoden gebruikt u momenteel om voortgang te meten? Wat werkt goed, en wat zou beter kunnen?*

3. Extra: Frequentie van evaluaties: *" Hoe vaak evalueert u de voortgang van een patiënt, en hoe gebeurt dat meestal?"*

DEEL B: VERKENNEN VAN MOGELIJKHEDEN VOOR HET SLIMME SHIRT (20 MINUTEN)
4. Mogelijke Toepassingen: *Wat voor mogelijke toepassingen van een shirt dat bewegingen van het bovenlichaam meet ziet u binnen een revalidatieproces? Bijvoorbeeld tijdens beoordelingen, oefeningen of thuistherapie Ziet u specifieke aandoeningen of blessures waarbij dit shirt vooral nuttig zou zijn?*

5. Gewenste Data en Functionaliteiten: *Welke soort bewegingsdata zou het meest waardevol zijn? Bijvoorbeeld: bewegingsbereik, asymmetrieën, houding of bewegingspatronen? Hoe nauwkeurig moet deze informatie zijn? Hoe zou u deze data het liefst gepresenteerd zien? Zou real-time feedback, rapporten of visualisaties nuttig zijn?*

6. Ervaring van Patiënt en Therapeut: H*oe zou dit shirt de ervaring van een revalidatieproces voor patiënten kunnen verbeteren? Bijvoorbeeld door motivatie, feedback of mogelijkheden voor afstandsmonitoring? Hoe zou de ervaring van het gebruiken van een smart shirt verschillen tussen patiënten? Hoe zou zo'n shirt u mogelijk* kunnen helpen bij uw werk? Bijvoorbeeld tijd kunnen besparen, de nauwkeurigheid verbeteren of uw workflow ondersteunen

7. Praktische Overwegingen: *Zijn er specifieke eisen voor het ontwerp van het shirt? Denk aan comfort, gebruiksvriendelijkheid, duurzaamheid of compatibiliteit met huidige tools?Wat zou het voor patiënten makkelijk maken om deze technologie regelmatig te gebruiken? Ziet u mogelijke obstakels voor het integreren van een dergelijk product in uw praktijk, zoals kosten, training of naleving door patiënten?*

8. Breder Perspectief/Toekomst: *Als dit shirt beschikbaar zou zijn en aan uw behoeften zou voldoen, hoe denkt u dat het het algehele revalidatieproces en sector zou veranderen? Zou dit nieuwe behandelingen mogelijk maken die met huidige methoden niet haalbaar zijn?*

AFSLUITING (5 MINUTEN)
Afronding: *"Uw feedback is van grote waarde voor het vormgeven van dit product. Is er nog iets dat u wilt delen of vragen?"*

Bedankt: Bedank hen voor hun tijd en inzichten. Bied aan om updates of resultaten van je onderzoek te delen.

x.c. Interview with rehabilitation physiotherapist and innovation manager

INTRODUCTIE (5 MINUTEN)
Stel jezelf kort voor en introduceer je project.
Leg uit wat je met het shirt hebt ontwikkeld en wat je ermee wilt bereiken.
Bespreek het doel van het interview: sparren over potentiële toepassingen, uitdagingen en kansen van het shirt in de revalidatiepraktijk gezien uit het perspectief van de fysiotherapeut.

1. Wat zijn uw ervaringen met innovaties in de revalidatiesector? Obstakels?
2. Wat verwacht je van wearables zoals een slim shirt in een klinische context?

TOEPASSINGEN VAN HET SHIRT (15 MINUTEN)
Gebruik je huidige shirt en de visualisaties in OpenSense als demonstratiemiddel.

3. Hoe zou je een dergelijk shirt kunnen inzetten in de revalidatiepraktijk bij Basalt?
4. Welke functionaliteiten zouden essentieel zijn om toe te voegen om dit shirt bruikbaar te maken voor therapeuten en patiënten?
5. Wat zou voor jou de belangrijkste voordelen zijn: thuisgebruik, training, feedback, of iets anders?
6. Hoe belangrijk zijn factoren zoals comfort, gebruiksgemak, en wasbaarheid?

TECHNOLOGISCHE BEHOEFTEN EN INTEGRATIE (15 MINUTEN)
Verken de technische aspecten die het shirt bruikbaar maken in de praktijk.

7. Welke parameters zijn volgens jou het meest waardevol om te meten (bijv. hoeken, snelheid, compensaties)? Moet dit in real-time of is opslaan data ook genoeg?
8. Hoe belangrijk is het om biofeedback in real-time aan te bieden? Op welke manier zou dit nuttig kunnen zijn voor patiënten?
9. Hoe zou je een dergelijke technologie willen koppelen aan bestaande systemen of behandelplannen binnen Basalt?

VISUALISATIE EN ANALYSE (10 MINUTEN)
Bespreek de huidige OpenSense-visualisaties en hoe deze waardevol kunnen zijn.

10. Hoe belangrijk is visualisatie van bewegingen voor het behandelen en trainen van patiënten?
11. Wat voor soort visualisaties (bijv. een skeletmodel, grafieken, rapportages) zouden het meest waardevol zijn voor therapeuten en patiënten?
12. Hoe zie je het shirt functioneren naast of als aanvulling op traditionele klinische testen?

CONCLUSIE EN TOEKOMST (5 MINUTEN)
Rond het gesprek af en vraag naar haar inzichten over de toekomst van dergelijke innovaties.

13. Wat zou een belangrijke volgende stap zijn om dit concept verder te brengen?
14. Zijn er specifieke revalidatiecases binnen Basalt waar je denkt dat dit shirt direct waardevol kan zijn?
15. Zijn er andere technologieën of partners waarmee je denkt dat het nuttig zou zijn om samen te werken?

AFSLUITING
Bedank haar voor haar tijd en input.
Vraag of ze eventueel geïnteresseerd is in verdere samenwerking of feedback op een later moment.

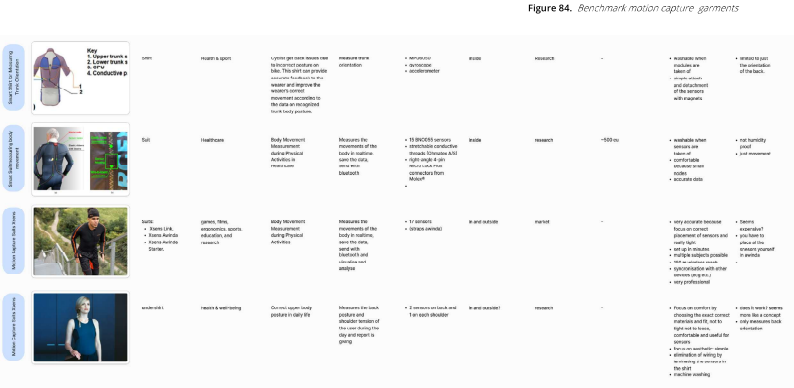
D. Analysis of expert interviews

Figure 82. *Slide shown during interviews*

Figure 83. *Slide shown during interviews*

E. Benchmark of IMU-based mocap smart garments

Figure 84. *Benchmark motion capture garments*



F. Current tools and methods: Differently ordered

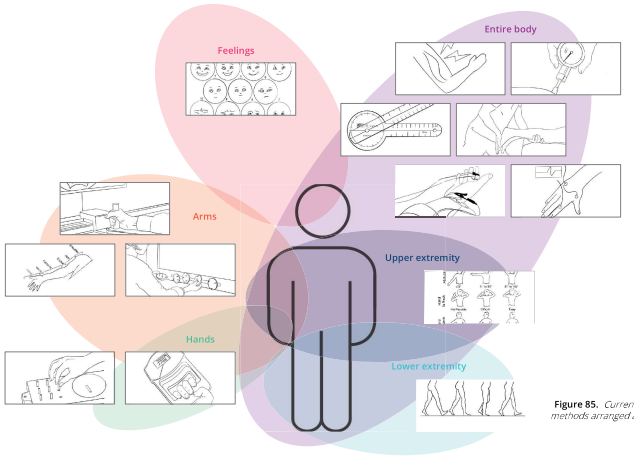


Figure 85. *Current tools and methods arranged at targeted body part.*

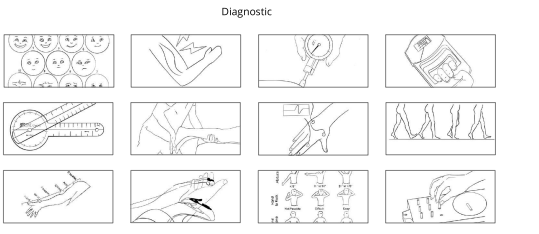


Figure 86. *Current tools and methods divided in diagnostic and therapeutic methods*

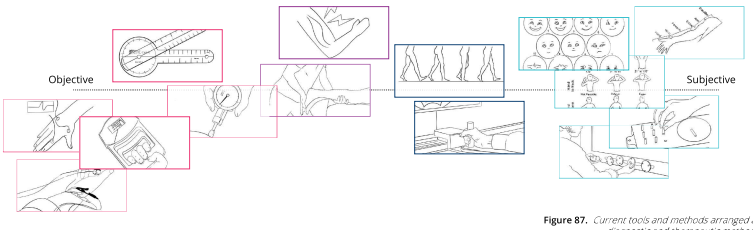


Figure 87. *Current tools and methods arranged at diagnostic and therapeutic methods*

G. Ideation of wire placement

Figure 88. *Different wire configurations on the arms*

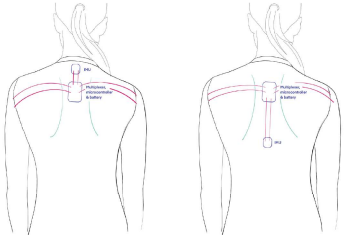


Figure 89. *Wire configurations of different IMU placement on the back*

H. Wiring of the multiplexer

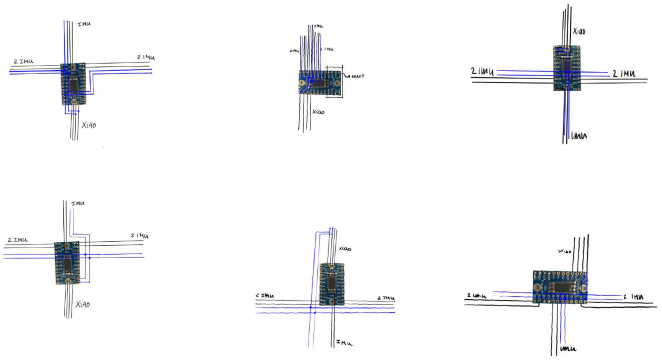


Figure 90. *Wiring to multiplexer*

I. Drift test

Drift	IMU 1				IMU 2				IMU 3				IMU 4				IMU 5			
time	w	x	y	z	w	x	y	z	w	x	y	z	w	x	y	z	w	x	y	z
15:13:00.017	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,10	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:14:00.041	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	0,99	0,10	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:15:00.076	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	0,99	0,10	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:16:00.051	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:17:00.046	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:18:00.059	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:19:00.012	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:20:00.104	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:21:00.096	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:22:00.106	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00
15:23:00.120	1,00	0,04	0,03	0,00	0,96	-0,27	0,07	0,00	1,00	0,09	0,03	0,00	0,98	-0,19	0,06	0,00	1,00	0,02	-0,02	0,00

Figure 92. *Table with the quaternion output of the different IMUs during the drift test*

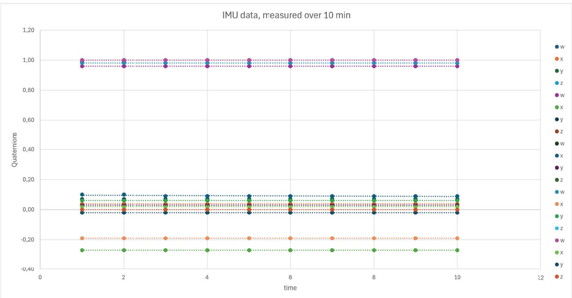


Figure 91. *Graph depicting the quaternion output of the shirt during the drift test over*

J. Costs

#	Part name	Part description	Material	Quantity	Price(€) (Excl. BTW)	Total price (€)	Source
1	IMU	Adafruit 9-DOF Absolute Orientation IMU Fusion Breakout - BNO055 - STEMMA QT / Qwiic	PCB	5	€ 28,49	€ 142,45	https://www.kiwi-electronics.com/nl/adafruit-9-dof-absolute-orientation-imu-fusion-breakout-bno055-stemma-qt-qwiic-10417?country=NL&utm_term=10417&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw7pO_BhAlEiwA4pMQvJLieZ2wa4mLEXhjIIZ867OP7L0fXTW1guRs9A31OplfWNUVUud8pRoCi0kQAvD_BwE
2	Multiplexer	TCA9548A I2C Multiplexer	PCB	1	€ 5,69	€ 5,69	https://www.kiwi-electronics.com/nl/tca9548a-i2c-multiplexer-2762?search=multiplexer%20tca&_gl=1*187xsad*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=CjwKCAjw7pO_BhAlEiwA4pMQvJLieZ2wa4mLEXhjIIZ867OP7L0fXTW1guRs9A31OplfWNUVUud8pRoCi0kQAvD_BwE
3	Microcontrollor	Seeed Studio XIAO nRF52840 Sense with bluetooth function	PCB	1	€ 15,49	€ 15,49	https://www.kiwi-electronics.com/en/seeed-studio-xiao-nrf52840-sense-11213?srsltid=AfmBOor60F8GDnsigU3OXFaWIBcN26-SrKIeF9NTYOuVkJQ6JUxSMy1G
4	Shirt	Women Thermo LS IM-BLACK XS, The Indian Maharadja		1	€ 29,75	€ 29,75	Maltha Sport Delft
5	Connectors	STEMMA QT / Qwiic JST SH 4-Pin Cable - 50mm Long		3,5	€ 0,95	€ 3,33	https://www.kiwi-electronics.com/nl/stemma-qt-qwiic-jst-sh-4-pin-cable-50mm-long-10390?search=stemma%20qt%20cables
6	Conductive thread	Conductive thread integrated in elastic		1	€ 9,46	€ 9,46	https://elektronicavoorjou.nl/product/conductive-thread-20-
7	Lakenkatoen	Non stretching textile	100% cotton	0,1	€ 6,95	€ 0,70	Schröder Rotterdam
8	Protective tube	Jersey biaisband, black, 20 mm wide	100% viscose	1	€ 0,49	€ 0,49	https://driessenstoffen.nl/product/biaisband-jersey-zwart/
9	Cover of IMUs	Elastic band		0,2	€ 4,77	€ 0,95	https://www.amazon.nl/Elastiek-gemakkelijk-vervormbaar-elastische-
10	Thread blue	Blue sewing thread for aesthetics over the protective tubes	100 % cotton	0,1	€ 3,95	€ 0,40	https://www.textielstad.nl/seralon-200mt-2126-danish-teal-s2126-200.html?_gl=1*ntvinb*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=Cj0KCQjwoNzABhDbARIsALfY8VPM38Z_v8gu8v5juLcvFc7BSUp3JxuVNik7ctrjZCL97OI1C0aGg4IaArOEEALw_wcB&gbraid=0AAAAACvKqOB5Yc-rO021fUysj0sUHAOUt
11	Thread black	Sewing thread, black, for connecting all the textile parts in the shirt	mousse, 100% polyester	0,01	€ 6,05	€ 0,06	https://www.textielstad.nl/seraflock-1000mt-4000-black-gsf4000-1000.html?gad_source=1&gbraid=0AAAAACvKqOCAooR1J4_nPcSKgYLvL1vCI&gclid=Cj0KCQjwoNzABhDbARIsALfY8VMSz4yp3xTaix-smci7WJkqyazeXWEXuWHsMisiL5mZnZoR7bdJuVEaAm3VEALw_wcB
12	Anti slip elastic	Anti slip elastic band for around the wrists		0,3	€ 2,24	€ 0,67	https://www.stoffen-hemmers.nl/antislip-rubberen-band-10-mm-zwart?quantity=1.00&gad_source=1&gbraid=0AAAAAC_gVJYcHwKL5BoXuQge83BwuM8Sj&gclid=Cj0K
13	Reinforcement material	Iron on reinforcement material (per cm^2)		300	€ 0,00	€ 0,21	https://www.textielstad.nl/vlieseline-h250-zwart-vl-h250z.html?gad_source=1&gbraid=0AAAAACvKqODm_MxcfWYtVXYNQeaJhVbiL&gclid=CjwKCAjw--
14	Electrical wires	Conventional electrical wires between multiplexer and microcontrollor (5 cm long)		12	€ -	€ -	From applied labs
15	USB-C cable	Long USB-C cable		1	€ 6,99	€ 6,99	https://www.smartphonehoesjes.nl/braided-usb-c-naar-usb-c-kabel-2-meter-wit.html
16	Ferrules	Ferrules to fasten electrical thread to electrical wires		40	€ 0,04	€ 1,56	https://www.amazon.nl/edi-tronic-Adereindhulzen-ge%C3%AFsoleerd-75-EN-0/dp/B072BZ563S?ref_=Oct_d_obs_d_16418938031_3&pd_rd_w=AVqVB&content-id=amzn1.sym.1434a312-8362-415e-b7d6-0a42f28f7b4e&pf_rd_p=1434a312-8362-415e-b7d6-0a42f28f7b4e&pf_rd_r=C2Y6QPRNNY6ZADA40M1S&pd_rd_wg=uevRi&pd_rd_r=d4091a2a-5049-44a6-b2c2-39b54843c719&pd_rd_i=B072BZ563S&th=1
Total						**€ 218,20**	

K. Evaluation of static poses

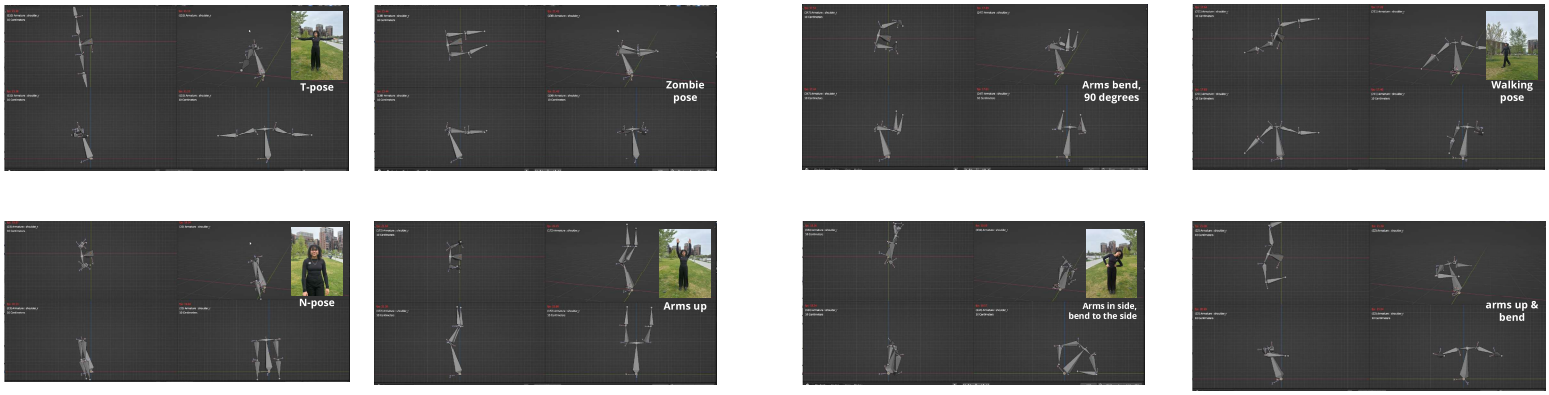


Figure 93. *Blender visualisation screen shots in different poses*

L. Blender script

```
import bpy
import serial
import threading
import time
import mathutils
import math
from mathutils import Quaternion

# Serial port settings
arduino_port = "COM9"  # Replace with Arduino COM port
baud_rate = 115200

# Global variable for IMU data
imu_data = {
    "torso": [1, 0, 0, 0.],  # Quaternion: w, x, y, z
    "humerus_l": [1, 0, 0, 0],  # Left upper arm
    "ulna_l": [1, 0, 0, 0.],  # Left forearm
    "humerus_r": [1, 0, 0, 0.],  # Right upper arm
    "ulna_r": [1, 0, 0, 0.],  # Right forearm }

# Function to read serial data
def read_serial():
    print("Reading data from serial...")
    global imu_data
    try:
        ser = serial.Serial(arduino_port, baud_rate, timeout=1)
        print(f"Connected to Arduino on {arduino_port}")
        while True:
            line = ser.readline().decode("utf-8").strip()
            if line:
                parts = line.split(",")
                if len(parts) == 20:  # Ensure we get all quaternion data
                    imu_data["torso"] = [float(parts[0]), float(parts[1]), float(parts[2]), float(parts[3])]
                    imu_data["humerus_l"] = [float(parts[4]), float(parts[5]), float(parts[6]),
float(parts[7])]
                    imu_data["ulna_l"] = [float(parts[8]), float(parts[9]), float(parts[10]),
float(parts[11])]
                    imu_data["humerus_r"] = [float(parts[12]), float(parts[13]), float(parts[14]),
float(parts[15])]
                    imu_data["ulna_r"] = [float(parts[16]), float(parts[17]), float(parts[18]),
float(parts[19])]
    except Exception as e:
        print(f"Error: {e}")
    finally:
        ser.close()

def apply_x_rotation(quaternion):
    rotation_matrix = mathutils.Matrix.Rotation(math.radians(-90), 3, 'X')
    # Convert input list to Quaternion if it's not already
    if not isinstance(quaternion, mathutils.Quaternion):
        quaternion = mathutils.Quaternion(quaternion)
    # Convert quaternion to rotation matrix
    q_matrix = quaternion.to_matrix()
    # Multiply the rotation matrices
    result_matrix = rotation_matrix @ q_matrix
    # Convert back to quaternion
    return result_matrix.to_quaternion()

def apply_y_rotation(quaternion):
    # Create a 3x3 rotation matrix for 90-degree rotation around Y-axis
    rotation_matrix = mathutils.Matrix.Rotation(math.radians(-90), 3, 'Y')
    # Convert input list to Quaternion if it's not already
    if not isinstance(quaternion, mathutils.Quaternion):
        quaternion = mathutils.Quaternion(quaternion)
    # Convert quaternion to rotation matrix
    q_matrix = quaternion.to_matrix()
    # Multiply the rotation matrices
    result_matrix = rotation_matrix @ q_matrix
    # Convert back to quaternion
    return result_matrix.to_quaternion()

def apply_z_rotation(quaternion):
    # Create a 3x3 rotation matrix for 180-degree rotation around Z-axis
    rotation_matrix = mathutils.Matrix.Rotation(math.radians(180), 3, 'Z')
    # Convert input list to Quaternion if it's not already
    if not isinstance(quaternion, mathutils.Quaternion):
        quaternion = mathutils.Quaternion(quaternion)
    # Convert quaternion to rotation matrix
    q_matrix = quaternion.to_matrix()
    # Multiply the rotation matrices
    result_matrix = rotation_matrix @ q_matrix
    # Convert back to quaternion
    return result_matrix.to_quaternion()

# Function to update bone rotations in Blender
def update_bones():
    global imu_data

    # Get armature object
    armature = bpy.data.objects["Armature"]  # Ensure your armature is named "Armature"

    # Enter pose mode
    bpy.context.view_layer.objects.active = armature
    bpy.ops.object.mode_set(mode='POSE')

    # Update torso rotation - 90 degrees around Y-axis
    torso_bone = armature.pose.bones.get("torso")
    if torso_bone:
        q = imu_data["torso"]
        rotated_q = apply_y_rotation(q)
        rotated_qq = apply_x_rotation(rotated_q)
        torso_bone.rotation_quaternion = (rotated_qq.w, rotated_qq.y, -rotated_qq.x, rotat-
ed_qq.z)

    # Update left humerus rotation
    humerus_l_bone = armature.pose.bones.get("humerus_l")
    if humerus_l_bone:
        q = imu_data["humerus_l"]
        humerus_l_bone.rotation_quaternion = (q[0], q[2], -q[1], q[3])

    # Update left ulna rotation - 180 degrees around Z-axis
    ulna_l_bone = armature.pose.bones.get("ulna_l")
    if ulna_l_bone:
        q = imu_data["ulna_l"]
        rotated_q = apply_z_rotation(q)
        ulna_l_bone.rotation_quaternion = (rotated_q.w, -rotated_q.y, rotated_q.x, rotated_q.z)

    # Update right humerus rotation - 180 degrees around Z-axis
    humerus_r_bone = armature.pose.bones.get("humerus_r")
    if humerus_r_bone:
        q = imu_data["humerus_r"]
        rotated_q = apply_z_rotation(q)
        humerus_r_bone.rotation_quaternion = (rotated_q.w, rotated_q.y, -rotated_q.x, rotat-
ed_q.z)

    # Update right ulna rotation
    ulna_r_bone = armature.pose.bones.get("ulna_r")
    if ulna_r_bone:
        q = imu_data["ulna_r"]
        ulna_r_bone.rotation_quaternion = (q[0], -q[2], q[1], q[3])

    # Refresh the Blender view
    bpy.context.view_layer.update()
    print(imu_data)


# Run the serial reader in a background thread
serial_thread = threading.Thread(target=read_serial, daemon=True)
serial_thread.start()

# Run the bone updater in Blender's main loop
def main_loop(scene):
    update_bones()

# Add the main loop to Blender's handlers
bpy.app.handlers.frame_change_pre.append(main_loop)

print("Lets move!")
```

Figure 94. *Blender script*

M. Arduino IDE code

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Adafruit_BNO055.h>

// defines the sample rate
#define BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS (100)

Adafruit_BNO055 bno1 = Adafruit_BNO055(55, 0x28, &Wire); // Sensor on Channel 1
Adafruit_BNO055 bno2 = Adafruit_BNO055(56, 0x28, &Wire); // First sensor on Channel 0
Adafruit_BNO055 bno3 = Adafruit_BNO055(57, 0x29, &Wire); // Second sensor on Channel 0
Adafruit_BNO055 bno4 = Adafruit_BNO055(58, 0x28, &Wire); // First sensor on Channel 3
Adafruit_BNO055 bno5 = Adafruit_BNO055(59, 0x29, &Wire); // Second sensor on Channel 3

#define MUX_ADDR 0x70  // Default I2C address for TCA9548a

void selectChannel(uint8_t channel) {
  if (channel > 7) return;
  Wire.beginTransmission(MUX_ADDR);
  Wire.write(1 << channel);
  Wire.endTransmission();}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Wire.begin();

  // Initialize sensors on different channels
  selectChannel(1);
  if (!bno1.begin()) {
    Serial.println("Sensor 1 failed to initialize!");}
  selectChannel(0);
  if (!bno2.begin()) {
    Serial.println("Sensor 2 failed to initialize!");}
  if (!bno3.begin()) {
    Serial.println("Sensor 3 failed to initialize!");}
  selectChannel(3);
  if (!bno4.begin()) {
    Serial.println("Sensor 4 failed to initialize!");}
  if (!bno5.begin()) {
    Serial.println("Sensor 5 failed to initialize!");}

  // Set all sensors to use external crystal
  selectChannel(1);
  bno1.setExtCrystalUse(true);
  selectChannel(0);
  bno2.setExtCrystalUse(true);
  bno3.setExtCrystalUse(true);
  selectChannel(3);
  bno4.setExtCrystalUse(true);
  bno5.setExtCrystalUse(true);}

// Collect the rotational data from all the IMUs
void loop() {
  imu::Quaternion quat1, quat2, quat3, quat4, quat5;
  selectChannel(1);
  quat1 = bno1.getQuat();
  selectChannel(0);
  quat2 = bno2.getQuat();
  quat3 = bno3.getQuat();
  selectChannel(3);
  quat4 = bno4.getQuat();
  quat5 = bno5.getQuat();
  unsigned long time = millis();

  // Printing the rotational data in quaternions
  Serial.print(quat1.w()); Serial.print(", "); Serial.print(quat1.x()); Serial.print(", "); Serial.
print(quat1.y()); Serial.print(", "); Serial.print(quat1.z()); Serial.print(", ");
  Serial.print(quat2.w()); Serial.print(", "); Serial.print(quat2.x()); Serial.print(", "); Serial.
print(quat2.y()); Serial.print(", "); Serial.print(quat2.z()); Serial.print(", ");
  Serial.print(quat3.w()); Serial.print(", "); Serial.print(quat3.x()); Serial.print(", "); Serial.
print(quat3.y()); Serial.print(", "); Serial.print(quat3.z()); Serial.print(", ");
  Serial.print(quat4.w()); Serial.print(", "); Serial.print(quat4.x()); Serial.print(", "); Serial.
print(quat4.y()); Serial.print(", "); Serial.print(quat4.z()); Serial.print(", ");
  Serial.print(quat5.w()); Serial.print(", "); Serial.print(quat5.x()); Serial.print(", "); Serial.
print(quat5.y()); Serial.print(", "); Serial.print(quat5.z()); Serial.println();

  delay(BNO055_SAMPLERATE_DELAY_MS);}
```

Figure 95. *Arduino IDE code to gather quaternions of five BNOs*

N. User test results

Methodology

Participants

The study recruited a diverse group of participants aged between 18 and 65, including healthy adults and adults with upper body mobility issues. how many Inclusion in the study required participants to provide informed consent, acknowledging their voluntary participation and their understanding of how their data would be used.

Materials

Consent form, Smart shirt, Large Screen: Used to display real-time data visualization, Changing Area: A private space provided for participants to comfortably wear the shirt directly on their skin, which is essential for optimal sensor performance, comfort and fit, Phone to record the conversation and make pictures and videos, Feedback Tool: Included both structured questionnaires to facilitate comprehensive participant feedback.

Methods

The test was conducted in a controlled environment, structured into a 30-minute session for each participant. The session was divided into several key phases:

Introduction and Consent (5 minutes): Participants were briefed about the test's purpose, the technology, and the session's structure. Consent forms were collected at this stage.

Fitting and Initial Impressions (5 minutes): Participants were given privacy to put on the smart shirt if they wanted this. Initial reactions regarding the ease of wearing and comfort were documented.

Comfort (5 minutes): Overall comfort and expected comfort with extended time were assessed on a 7-point Likert scale. Points of discomfort were assessed using the ?? Method, were discomfort was rated on a 7 point scale (1: feel it - 7: really painful).

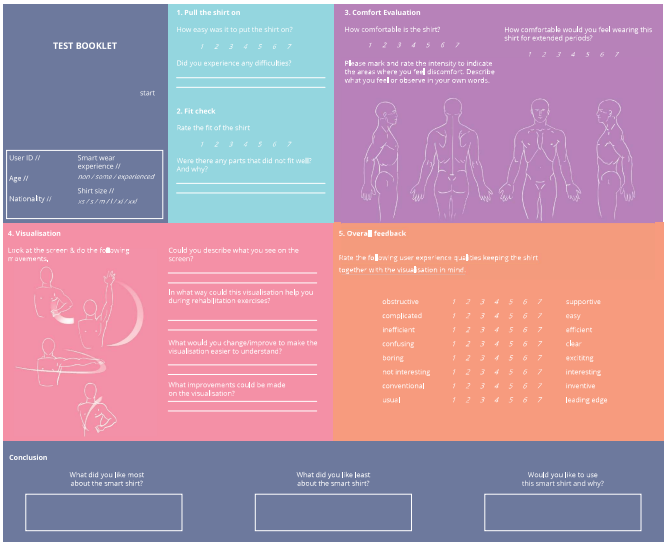
Interface Interaction (10 minutes): Participants interacted with the large screen displaying their movement visualisation, assessing the intuitiveness of the data presentation and the interface's ease of use.

User experience qualities (5 minutes): Participants were asked to rate the overall experience of using the smart shirt together with the visualisation based on the user experience qualities method.

Conclusion (5 minutes): Participants answered three concluding questions and were asked if they had something else they wanted to say. They were thanked for doing the test.

Data Collection

Data collection included video recordings and pictures to observe interactions and adjustments, as well as direct feedback from participants through a questionnaires which was filled out using the think out loud method. Notes were taken as well as recordings from the conversations. The qualitative data helped to understand user satisfaction and ergonomic aspects, while The quantitative data provided metrics on fit, comfort and user experience, while the qualitative data helped understand the reasoning behind the quantitave data and insights in the understandability of the visualisation.



	what do you see	how does it help you	change/improve for understandability	improvements
1	A model of me which mimics my upper body mannequin, matched my movements and	It can help understand my movements and maybe motivate you	A bit more sense of direction because the model is symmetric Whats fornt/back, closer to a human 3D model, adding background and context, small tutorial/instruction video	Add a head to make it more humanlike
2	also represents the parts of the body moving triangle forms, in the same way as I	online/calls, check proper movements to get a more clear image of what you are capable right now and		use more organic forms/ regocnisable as a human body
3	move	your imporvements	make it mirrored, more organic forms	
4	kegelvormige, representatie van mijn lichaam met name het poppetje, die trekt 90% van	exactere opdrachten doen, weten wanneer ik fout sit comparing for example if my neck is stiff on one side, how far can	toevoegen van handen en hoofd make the hip join wider to visualise better the movement	rechthoekige/gelijke verbindingen tussen de joints
5	mijn aandacht, omdat het live voelt	I reach	between your hips	

Participant ID	What did you like most?	What did you like least?	Would you like to use this smart shirt?
1	How something which seems simple can help you understand your movements & help you	It was a bit hard to put on	If I needed it for rehabilitation I would definitely give it a try
2	alright fit, see the tech the build of the shirt, very responsive, works well	more clear positioning of the sensors on the lower arms especially	to be more autonomous in rehabilitation , so yess
3	it was really clear and easy to use, innovative & smooth working design	It was to warm (tody 20°), the plastic itches on the end of the sleeves	Dont need it right now, but for revalidation i think it could be useful
4	wanneer ik mijn bewegingen zag comeleren met het scherm	voelt nog beetje broekbaar	yoga om verbeteringen te kunnen zien
5	engaging, ownership, clear, straightforward	ik zou ook mn benen willen zien op het scherm	yes, not so much experience but it is intruiging and i think motivating

Participant ID	comfort	comfort extended time
1	5	4
2	6	4
3	5	5
4	5	5
5	7	6

Participant ID	comfort	comfort extended time
1	5	4
2	6	4
3	5	5
4	5	5
5	7	6
total	5,6	4,8

O. Consent form

Participant ID: .....

Master's Thesis on Smart Shirt

This research is conducted as part of the graduation project of the MSc Integrated Product Design at TU Delft.

Student: Hannah Herremans

Participant Consent Form

I voluntarily participate in this study.

I acknowledge that I have received sufficient information and explanation about this study beforehand and all my questions have been satisfactorily answered. I have been given the time I needed to consent to participation. I can ask questions regarding the research at any time. I understand that this research consists of:

1. **Interview**
2. **Observations**
3. **Questionaire**

I am aware that data will be collected during the research in the form of notes, photographs, and/or audio recordings. I consent to the collection of these data and the making of audio recordings and photographs during the research. Data will be processed and analyzed anonymously (without name or other identifiable information). These data will be available only to the researcher and TU Delft supervisors.

The photos and/or audio recordings will be used to support the analysis of collected data. Photos may also be used to illustrate research findings in publications and presentations about the project.

I consent to the use of photos of my participation: (select applicable)

☐ in which I am recognizable for publications and presentations about the project.

☐ in which I am not recognizable for publications and presentations about the project.

☐ only for data analysis purposes and not for publications and presentations about the project.

I consent to the retention and use of data for a maximum of 5 years after the completion of this research for educational and research purposes.

I acknowledge that no financial compensation is provided for participation in the research.

By signing, I confirm that I have read the information about the research and that I have understood the nature of my participation. I understand that I can withdraw or stop participating in the research at any time. I understand that I am not obliged to answer any questions I do not wish to answer and that I can communicate this to the research team.

A copy of this consent form will be given to me.

Last Name _____ First Name _____