

TONINGENIEUR PROJEKT
WS 2015/16



Universität für Musik und darstellende Kunst Graz
Institut für elektronische Musik und Akustik

HANDTRACKING MIT EINEM WIRELESS SENSOR

BETREUER: AO. UNIV.-PROF. DIPL.-ING. WINFRIED RITSCH

LETZTE BEARBEITUNG : 19. OKTOBER 2016

Thomas Mayr
0871285

Kurzfassung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus anderen Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Kunstuniversität Graz, am 19. Oktober 2016

Thomas Mayr

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IV
1 Einführung	1
1.1 Historische Verwendung eines Hyperinstruments	2
1.2 Anforderungen der Komponistin	3
2 Technischer Hintergrund	4
2.1 Beschleunigung und Gyroskop	4
2.2 Koordinatensystem	4
2.3 Quaternionen	6
2.4 Verarbeitung der Daten mit dem Arduino	10
2.4.1 Euler-Winkel Bestimmung	10
2.4.2 Bestimmung der Rotationsmatrix	11
2.4.3 Positionsbestimmung	11
2.5 Übertragung zu Max/MSP	12
3 Künstlerische Verarbeitung der Sensordaten	14
3.1 Beschreibung der Komposition	14
3.2 Planck Einheiten und Bezeichnung der acht Teilstücke	14
3.3 Steuerung der Elektronik mit den Sensor Daten	15
4 Ausblick	17
Literaturverzeichnis	18

Kurzfassung

Im Rahmen des 50-Jahre-Jubiläums des IEM wurde Teresa Carrasco mit einer Komposition für den Steirischen Herbst 2015 beauftragt. In ihrer Komposition wurde der Klang eines Klaviers durch Live-Elektronik der Komponistin erweitert und über im Raum speziell angeordnete Lautsprecher verteilt. Die Aufgabe bestand darin, die Bewegungen des Pianisten mit dem Klang in Verbindung zu bringen. Dazu wurde im Rahmen des Toningenieur-Projekts ein Beschleunigungssensor an der Hand des Pianisten angebracht und diese Daten an einen Arduino-Mikrocomputer gesendet. Nach der Aufbereitung der Daten wurden diese in Echtzeit an die Komponistin gesendet, um die Parameter der Live-Elektronik zu steuern.

Abstract

As part of the 50-year-anniversary of the IEM Teresa Carrasco was invited to compose a piece for the festival Steirischer Herbst in 2015. In this composition live electronics were added to the natural sound of the piano and then played on several loudspeakers distributed in the concert hall. The aim was to connect the moves of the pianist with the sound of the composition through live electronics. Therefore an acceleration sensor was attached to the hand of the pianist in order to track his moves while playing. The tracked data was sent to the composer in realtime to control the live electronics.

Abbildungsverzeichnis

1	Teresa Carrasco bei ihrer Aufführung <i>Radiazione di corpo nero</i> beim Steirischen Herbst 2015.	1
2	Beschleunigungssensor MPU6050. [1]	4
3	Yaw (ψ) - Pitch (θ) - Roll (ϕ) Winkel.	6
4	Darstellung vom Mengenraum von Vektoren bzw. Quaternionen. [13] . . .	8
5	Darstellung des Vektors \mathbf{v} im Raum der drei Basisvektoren eines Quaternionen.	9
6	Drehung des Quaternionen \mathbf{k} um $-\frac{\pi}{2}$ um die \mathbf{j} -Achse.	9
7	Empfang der seriellen Daten und Aufbereitung für weitere Verwendung. . .	13
8	Setup der Komposition für die Helmut List Halle in Graz. Gut zu sehen der Flügel auf der erhöhten Bühne, bestückt mit zwei Mikrofonen und vier Lautsprechern in die Mitte des Raumes gerichtet. Das Publikum in der Mitte des Raumes umringt von acht Lautsprechern. Die schwarzen Kreise am Rand des Raumes sollen die Positionen des Lichts markieren, welches ebenfalls Teil des Stückes ist. [2]	15
9	Auszug aus dem letzten Teilstück der Partitur. Es ist sehr gut zu sehen, dass der Pianist eine Bewegung vom linken Rand des Klaviers (e der großen Oktave) bis zur Mitte (d') machen muss. [2]	16

Tabellenverzeichnis

1	Kombinationen der Produkte der einzelnen imaginären Einheiten der Quaternionen.	7
---	---	---

1 Einführung

Die Komponistin Teresa Carrasco wurde 1980 in Oviedo (Spanien) geboren, wo sie auch mit ihrer musikalischen Ausbildung begann. Ihr Studium Digital Arts und elektroakustische Komposition absolvierte sie bei Gabriel Brncic in Barcelona. Carrasco ging zwischen 2005 und 2007 zudem weiterführenden Studien in Medienkunst an der Hochschule für Gestaltung in Karlsruhe sowie in Komposition an der Musik Akademie Basel nach, u.a. bei Georg Friedrich Haas und bei Erik Oña im elektronischen Studio. Seit 2013 lehrt sie Elektronische Musik an der Musikhochschule in Freiburg, seit 2015 auch an der Bauhaus Universität und an der Musikhochschule Franz Liszt in Weimar. Ihre Kompositionen wurden weltweit auf verschiedensten Festivals und in Konzertsälen aufgeführt, darunter in der Queen Elisabeth Hall in London, Cité de la Musique in Paris, Darmstädter Ferienkurse 2012, Northwestern University Chicago, Universidad Nacional Autónoma de México, University of Birmingham, ZKM Karlsruhe, ICST Zürich, SARC Belfast, CCCB Barcelona und im Círculo de Bellas Artes Madrid.[4]

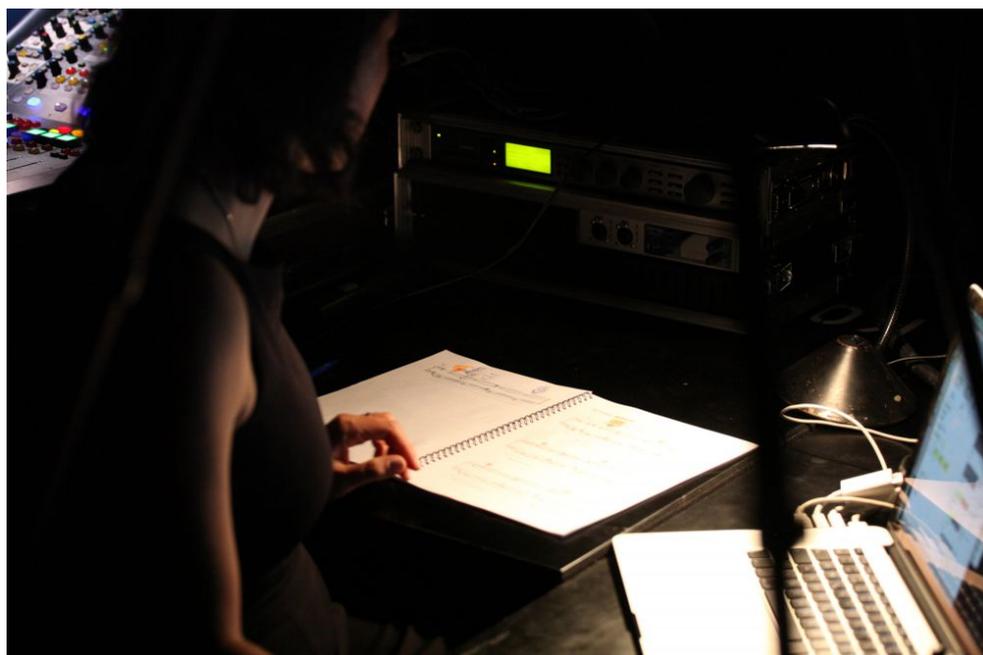


Abb. 1: Teresa Carrasco bei ihrer Aufführung *Radiazione di corpo nero* beim Steirischen Herbst 2015.

In ihrer Komposition verwendet sie die Bewegungen des Pianisten dazu, Parameter der Live-Elektronik in Echtzeit zu steuern. Zusätzlich wird das Klavier mit zwei Mikrofonen mikrofoniert, um den Klang einerseits in Echtzeit zu verarbeiten und andererseits um Aufnahmen zu machen, die später im Stück verwendet werden. Die Bewegungen des Pianisten werden über einen Beschleunigungssensor getrackt und über eine Netzwerkverbindung an die Komponistin gesendet. Dazu wird ein Arduino Mikrocomputer verwendet, der in Echt-

zeit einzelne Parameter aus der Bewegung des Pianisten berechnen kann. Christian Scheib beschreibt die Arbeit Carrascos in der Broschüre des Steirischen Herbstes 2015 wie folgt:

*»Der Pianist und sein schwarzes Instrument agieren und fungieren als ein, um es in sprachlicher Nähe zur Planckschen Quantenphysik zu sagen, „idealer schwarzer Körper“: Darauf beruht das Konzept für die Komposition *Radiazione di corpo nero* von Teresa Carrasco. Diese „Schwarzkörperstrahlung“ benennt in der Physik ein bestimmtes, ausgesandtes Strahlungsspektrum, das unabhängig von allen Hohlraumcharakteristika außer der Temperatur ist. Deswegen irritiert ein reales Objekt innerhalb des Hohlraumes nicht die Strahlungsdichte. Allerdings: Die spektrale Bestrahlungsdichte, der der Körper ausgesetzt ist, muss gleich der spektralen Strahldichte des Strahlungsfeldes sein, in dem er sich befindet. Ein solcher idealisierter Strahlungsabsorber heißt dann nämlich „Schwarzer Körper“. Teresa Carrasco betreibt in und mit ihrem *Radiazione di corpo nero* alias Schwarzkörperstrahlung aber nicht Physik, sondern Musik. „Frequenzspektren des Stückes“, schreibt sie, „werden durch die Temperatur, Position, Bewegung des Pianisten und durch das experimentelle Arbeiten mit den multiplen Möglichkeiten des Flügels als Resonanzkörper beeinflusst.“ Und im Hohlraum, „Konzerthalle“ werden die Parameter Temperatur, Position und Bewegung des „idealen schwarzen Körpers“, sprich des Pianisten und seines Instrumentes, die räumliche Verteilung und Bewegung des Klanges in Echtzeit in einem Multikanal-System beeinflussen.« [4]*

Die Beeinflussung des Klanges anhand der Bewegungen des Pianisten soll in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben werden. Als erstes soll eine Einführung in das Quaternionen-Modell gegeben werden, anhand dessen eine genaue Umrechnung der Beschleunigungsdaten in Winkel-Daten erfolgt. In weiterer Folge wird beschrieben, wie die Daten zur Komponistin gelangen und dort zu einer Manipulation des Klanges führen.

1.1 Historische Verwendung eines Hyperinstruments

Die Idee der Komponistin, das Instrument Klavier um die Komponente der Bewegung zu erweitern, wird historisch gesehen als Hyperinstrument bezeichnet. Diese Idee stammt von Tod Machover¹, der physische Instrumente erweitern wollte, indem er Technologien verwendete, um dem Instrumentalisten mehr Virtuosität zu verleihen. Techniken wie Feature²-Extrahierung, das Anbringen von Sensoren am Instrument oder dem Instrumentalisten und Gestalt-Erkennung werden als Methoden bezeichnet.

In den 1980er Jahren benutzten Komponisten wie David Kean einen **Taktstab** dazu, computergenerierte Klänge den Bewegungen des Taktstabes folgen zu lassen. Dies wurde durch Mustererkennung erreicht, welche die Bewegungen des Taktstabes in Gesten umwandelte.

¹Tod Machover, 1953, amerikanischer Komponist.

²mit Features im Audio-Bereich sind hier gewisse Eigenschaften eines Audiosignals gemeint wie zum Beispiel in welchem spektralen Bereich sich die meiste Energie befindet oder ob es sich um ein eher harmonisches oder transientes Signal handelt.

Ein weiteres Instrument, welches von der Firma Palmtree Instruments entwickelt wurde, ist die **Airdrum**, welche über einen 2D-Beschleunigungssensor und einen Rotations-Detektor ebenfalls die Bewegungen der Hände analysiert und als MIDI-Daten weitersendet.

Controller, welche Bewegungen in MIDI-Daten umwandeln, sind in einer sehr großen Anzahl vorhanden, sodass es unmöglich ist, alle hier anzuführen. Ein anderer Ansatz verfolgt die Idee, Körperparameter wie Körpertemperatur, den elektrischen Hautwiderstand, Augen-, Hirn- oder die Herzaktivität als Messwerte zu verwenden. Im Zuge dieser neuen technologischen Parameter entstanden in den 1960er und 1970er Jahren zahlreiche Musikproduktionen und Performances unter dem Namen **BioFeedback**. Ein Instrument ist die **BioMuse**, welche die elektrischen Aktivitäten des Körpers in MIDI-Daten umwandelt. Hier wurden Sensoren am Körper angebracht und über eine Batterie, welche am Gürtel befestigt wurde, betrieben.

Ein anderer Controller, welcher Positionen von Körperteilen messen kann, ist unter dem Namen **Data Glove** bekannt. Dieser Daten-Handschuh liefert genaue Daten über die Bewegungen der Finger und über die Position der Hände. Mit einem Ultrasensor kann zusätzlich die Entfernung von zwei verwendeten Handschuhen gemessen werden.

Die Möglichkeit, Tanzbewegungen in Musik zu transformieren, wurde auch schon am IEM im Zuge der Aufführung **Maschinenhalle** realisiert. Hier wurden Sensoren an Klangplatten befestigt, um so die Bewegungen der Tänzer über einen Algorithmus an ein Automatenklavier zu übertragen. Ein etwas früherer Ansatz wurde 1999 am MIT mit den **Dancing Shoes**[11] realisiert. Es wurden insgesamt 16 Sensoren an jeweils einem Schuh angebracht, um den Druck auf den Boden, die Winkelung der Sohle, die 3-Achsen Orientierung, die Beschleunigung und die translatorische Bewegung mit einem Sonar-Sender zu messen.

Mit dem **Theremin**³ wurde schon viel früher ein Instrument entwickelt, wo ebenfalls Bewegungen eine Rolle spielten, jedoch ohne das Instrument zu berühren. Dieser Ansatz wurde in zahlreichen Varianten fortgeführt, wobei ebenfalls die Handposition für die Steuerung entscheidend war.

Eine erst seit kurzem mögliche Variante Bewegungen eines Instrumentalisten zu tracken besteht darin, die Bewegungen mittels Kamerasystem zu erfassen. Am IEM ist ein solches Infrarot Motion Tracking System vorhanden.

1.2 Anforderungen der Komponistin

Die Komponistin stellte folgende Anforderungen an den Sensor:

- Kabellose Verbindung zwischen Sensor und Computer
- Einfache Anbringung an der Hand des Pianisten
- Winkelmessung des Armes des Pianisten
- Positionsmessung des Sensors am Arm des Pianisten

³Lew Termin, 1896 - 1993, russischer Physiker und Erfinder

2 Technischer Hintergrund

In diesem Abschnitt sollen die technischen Details vom Sensor bis zur Aufbereitung der Daten für Max/Msp besprochen werden.

2.1 Beschleunigung und Gyroskop

Als Sensor wurde der Beschleunigungssensor MPU6050 der Firma InvenSense verwendet. Dieser kombiniert ein 3-Achsen Gyroskop und einen 3-Achsenbeschleunigungsmesser auf einem Chip, zusammen mit einem boardinternen Digital Motion Processor (DMP), der komplexe 9-Achsen-MotionFusion-Algorithmen verarbeiten kann. Die integrierten 9-Achsen-MotionFusion-Algorithmen greifen über einen zusätzlichen Master-I2C-Bus auf externe Magnetometer oder andere Sensoren zu, wodurch die Erfassung eines kompletten Sensordatensatzes ohne Eingriff durch einen Systemprozessor gewährleistet wird. Zusätzlich bietet der Sensor noch einen Temperaturmesser, welcher ebenfalls von der Komponistin genutzt wurde.



Abb. 2: Beschleunigungssensor MPU6050. [1]

2.2 Koordinatensystem

Um eine Drehung im \mathbb{R}^3 beschreiben zu können, gibt es mehrere Möglichkeiten. Auf Basis der Rotationsmatrizen bieten sich die Euler- bzw. Roll-Pitch-Yaw Winkel an. Mit diesem Satz von Winkeln wird die Parametrierung einer Drehung beschrieben, bei der die Einträge einer (3×3) -Drehmatrix \mathbf{R} nicht linear unabhängig sind und die Orientierung auf drei Freiheitsgraden beruht.

Eulerwinkel

Um die Rotation eines Körpers zwischen zwei rechtwinkligen Koordinatensystemen beschreiben zu können, führte Euler⁴ die Eulerwinkel ein. Bei dieser Parametrierung handelt es sich um ein körperfestes Koordinatensystem, wo die Winkel (ϕ, θ, ψ) die Drehung beschreiben. Führt man zuerst eine Drehung um den Winkel ϕ bezüglich der z_0 -Achse, anschließend um den Winkel θ bezüglich der (gedrehten) momentanen y -Achse und abschließend um den Winkel ψ bezüglich der (gedrehten) momentanen z -Achse, ergeben sich folgende Drehmatrizen, die zu einer Matrix zusammengefasst werden können, wobei s und c für *sin* und *cos* stehen::

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = \mathbf{R}_{z,\phi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{x,\psi} &= \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\psi & -s_\psi & 0 \\ s_\psi & c_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Roll-Pitch-Yaw Winkel

Wird hingegen eine Parametrierung der Drehwinkeln (ϕ, θ, ψ) um die Koordinatenachsen eines ortsfesten Koordinatensystems vorgenommen, wo ein Körper zuerst um den Winkel ψ bezüglich der x_0 -Achse, anschließend um den Winkel θ bezüglich der y_0 -Achse und schlussendlich um den Winkel ϕ bezüglich der z_0 -Achse gedreht wird, kann man dies mit folgender Drehmatrix darstellen, wobei jede Drehung als eigene Matrix darstellbar ist. Führt man diese Drehungen hintereinander aus, ergeben sich wieder die Drehmatrizen:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} = \mathbf{R}_{z,\phi} \mathbf{R}_{y,\theta} \mathbf{R}_{x,\psi} &= \begin{bmatrix} c_\phi & -s_\phi & 0 \\ s_\phi & c_\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta & 0 & s_\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_\theta & 0 & c_\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_\psi & -s_\psi \\ 0 & s_\psi & c_\psi \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_\phi c_\theta & -s_\phi c_\psi + c_\phi s_\theta s_\psi & s_\phi s_\psi + c_\phi s_\theta c_\psi \\ s_\phi c_\theta & c_\phi c_\psi + s_\phi s_\theta s_\psi & -c_\phi s_\psi + s_\phi s_\theta c_\psi \\ -s_\theta & c_\theta s_\psi & c_\theta c_\psi \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2.2)$$

Dabei werden ψ als Gierwinkel (yaw angle), θ als Nickwinkel (pitch angle) und ϕ als Wankwinkel (roll angle) bezeichnet, wie in Abbildung 3 zu sehen ist. [7]

⁴Leonard Euler, 1707 - 1783, schweizer Mathematiker und Physiker.

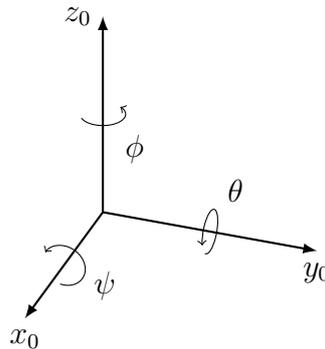


Abb. 3: Yaw (ψ) - Pitch (θ) - Roll (ϕ) Winkel.

Gimbal Lock

Werden drei Drehungen in allen drei Achsen hintereinander ausgeführt und fallen die Achsen der ersten und der dritten Drehung zusammen, spricht man vom sogenannten Gimbal Lock oder auch von einer kardanischen Blockade. Dann ist nur noch die Summe aus erstem und drittem Winkel ausschlaggebend, verschiedene Kombinationen ergeben also dieselbe Drehung. Es fehlt somit ein Freiheitsgrad, was bedeutet, dass in eine Richtung nicht mehr gedreht werden kann. Um dieses Problem zu umgehen, verwendet man Quaternionen anstelle von Rotationsmatrizen. Dabei wird der mathematische Raum um eine Dimension erweitert. Weiters sind Quaternionen numerisch stabiler als Rotationsmatrizen, was zu mehr Genauigkeit führt.

2.3 Quaternionen

Die Quaternionen sind ein Zahlenbereich, der den Zahlenbereich der komplexen Zahlen auf die hyperkomplexen⁵ Zahlen erweitert. Benannt wurden sie nach William Hamilton⁶, der diesen Einfall während eines Spaziergangs am 16. Oktober 1843 hatte. Dieser Zusammenhang lässt sich folgendermaßen darstellen:

$$\mathbf{i}^2 = \mathbf{j}^2 = \mathbf{k}^2 = \mathbf{ijk} = -1 \quad (2.3)$$

wobei \mathbf{i} , \mathbf{j} und \mathbf{k} eine orthonormale Basis im \mathbb{R}^3 aufspannen. Diese Vektoren können folgendermaßen dargestellt werden:

$$\mathbf{i} = (1, 0, 0) \quad (2.4a)$$

$$\mathbf{j} = (0, 1, 0) \quad (2.4b)$$

$$\mathbf{k} = (0, 0, 1) \quad (2.4c)$$

⁵Hyperkomplexe Zahlen sind eine Verallgemeinerung der komplexen Zahlen.

⁶Sir William Rowan Hamilton, 1805 - 1865, irischer Mathematiker und Physiker.

Die Quaternionen entstehen aus den reellen Zahlen durch Hinzufügen dreier neuer Zahlen, denen ähnlich der imaginären Einheit die Namen \mathbf{i} , \mathbf{j} und \mathbf{k} gegeben wurden. Da sich der Raum der Quaternionen nicht mehr auf zwei Dimensionen beschränkt, ist es notwendig, auch die Produkte der beiden anderen imaginären Zahlen darzustellen:

	1	\mathbf{i}	\mathbf{j}	\mathbf{k}
1	1	\mathbf{i}	\mathbf{j}	\mathbf{k}
\mathbf{i}	\mathbf{i}	-1	\mathbf{k}	$-\mathbf{j}$
\mathbf{j}	\mathbf{j}	$-\mathbf{k}$	-1	\mathbf{i}
\mathbf{k}	\mathbf{k}	\mathbf{j}	$-\mathbf{i}$	-1

Tab. 1: Kombinationen der Produkte der einzelnen imaginären Einheiten der Quaternionen.

Hierbei ist offensichtlich, dass die Multiplikation von \mathbf{i} , \mathbf{j} und \mathbf{k} nicht kommutativ ist, da $\mathbf{ij} \neq \mathbf{ji}$. Die Menge der Quaternionen wird allgemein nach Hamilton mit einem \mathbb{H} dargestellt. Sie sind ein Quadrupel aus reellen Zahlen:

$$\mathbb{H} = \mathbb{R}^4 = (r, x, y, z) | r, x, y, z \in \mathbb{R}. \quad (2.5)$$

Quaternionen lassen sich alternativ in der Form

$$v = r + x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \in \mathbb{H} \quad (2.6)$$

darstellen, wobei v in zwei Teile unterteilt ist:

1. in den Realteil $\text{Re}(v) = r \in \mathbb{R}$
2. in den Imaginärteil $\text{Im}(v) = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k}$.

Der Imaginärteil $\text{Im}(v)$ ist ein 3-Tupel und damit ein Vektor in \mathbb{R}^3 :

$$\begin{aligned} \mathbb{R}^3 &= \{(x, y, z) | x, y, z \in \mathbb{R}\} \\ &= \{x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} | x, y, z \in \mathbb{R}\} \\ &= \{v \in \mathbb{H} | \text{Re}(v) = 0\} = \text{Im}(\mathbb{H}). \end{aligned}$$

Die komplex konjugierte eines Quaternions:

$$q = q_0 + \mathbf{q} = q_0 + \mathbf{i}q_1 + \mathbf{j}q_2 + \mathbf{k}q_3 \quad (2.7)$$

wird als q^* bezeichnet und wird wie folgt berechnet:

$$q^* = q_0 - \mathbf{q} = q_0 - \mathbf{i}q_1 - \mathbf{j}q_2 - \mathbf{k}q_3 \quad (2.8)$$

Quaternionen mit Realteil gleich Null bezeichnet man auch als reine Quaternionen \mathbb{H}_0 . Dadurch wird der \mathbb{R}^4 auf den \mathbb{R}^3 reduziert, womit Darstellungen in drei Dimensionen möglich sind, was in Abbildung 4 zu sehen ist.

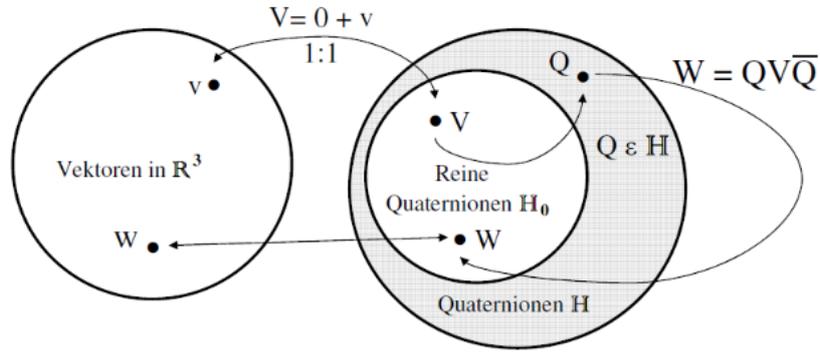


Abb. 4: Darstellung vom Mengenraum von Vektoren bzw. Quaternionen. [13]

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit soll noch vorgestellt werden, wie die Beschleunigungs-sensordaten mit den Quaternionen zusammenhängen. Wir interessieren uns als erstes für die Rotationen im \mathbb{R}^3 . Dazu benötigen wir die Euler-Formel erweitert um zwei komplexe Dimensionen zu:

$$\mathbf{q} = e^{\frac{\theta}{2}(u_x \mathbf{i} + u_y \mathbf{j} + u_z \mathbf{k})} = \cos \frac{\theta}{2} + (u_x \mathbf{i} + u_y \mathbf{j} + u_z \mathbf{k}) \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.9)$$

Um eine Rotation durchführen zu können, benötigen wir die Formel für eine Drehung im \mathbb{R}^3 :

$$w = qvq^* \quad (2.10)$$

Als Beispiel betrachten wir folgendes Ursprungs-Quaternion: $\mathbf{v} = 1\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k}$.

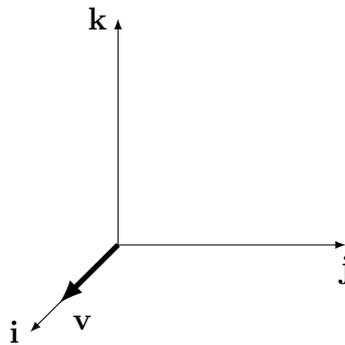


Abb. 5: Darstellung des Vektors \mathbf{v} im Raum der drei Basisvektoren eines Quaternion.

Um diesen Vektor um $\theta = -\frac{\pi}{2}$ um die \mathbf{j} -Achse drehen zu können, müssen wir dies in die Euler-Formel einsetzen:

$$\mathbf{q} = e^{-\frac{\pi}{4}(0\mathbf{i} + 1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})} = \cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) + (0\mathbf{i} + 1\mathbf{j} + 0\mathbf{k})\sin\left(-\frac{\pi}{4}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}}\mathbf{j} \quad (2.11)$$

Setzt man \mathbf{v} und \mathbf{q} in 2.10 ein, ergibt sich mit Tabelle 1

$$\begin{aligned}
 \mathbf{w} &= qvq^* = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}}j\right)(i)\left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}j\right) \\
 &= \left(\frac{1}{\sqrt{2}}i + \frac{1}{\sqrt{2}}k\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}j\right) \\
 &= \frac{1}{2}i + \frac{1}{2}k + \frac{1}{2}k - \frac{1}{2}i \\
 &= +\frac{2}{2}k = 1 \cdot k
 \end{aligned}$$

was einer Drehung des Quaternions \mathbf{v} von der \mathbf{i} -Achse zur \mathbf{k} -Achse bedeutet und auch aus Tabelle 1 ersichtlich ist.

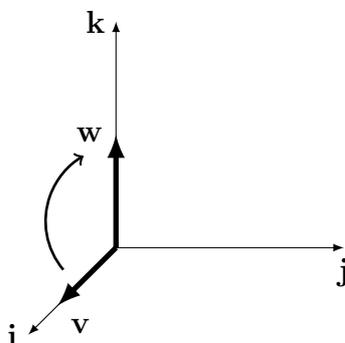


Abb. 6: Drehung des Quaternions \mathbf{k} um $-\frac{\pi}{2}$ um die \mathbf{j} -Achse.

2.4 Verarbeitung der Daten mit dem Arduino

Wie schon beschrieben, beinhaltet der MPU6050 Sensor einen Digital Motion Processor (DMP), welcher die Beschleunigungs- und Gyroskopdaten zusammenfügt, um dadurch Fehler im Inneren des Sensors zu vermeiden. Der DMP berechnet die Daten auf Basis der Quaternionen, welche nun in Euler-Winkel und weitere Informationen umgerechnet werden können. Um die Daten aus dem DMP zu extrahieren, wurde eine Bibliothek von Jeff Rowberg verwendet, welche frei zugänglich ist [12]. Jedes I2C Gerät wurde so gebaut, um über die I2Cdev Klasse auf einem Bit- und Byte-Level kommunizieren zu können.

Über die I2C Clock, die mit 400kHz arbeitet, wird ein FIFO-Buffer empfangen, aus dem die Quaternionen über die Funktion `dmpGetQuaternion` extrahiert werden. Das Quaternion liegt dann in folgender Form vor:

$$q = q_w + \mathbf{i}q_x + \mathbf{j}q_y + \mathbf{k}q_z \quad (2.12)$$

2.4.1 Euler-Winkel Bestimmung

Da die Quaternionen über die Beschleunigungs- und Gyroskop-Daten berechnet wurden, ist darin die Erdbeschleunigung enthalten. Die Richtung dieser kann folgendermaßen ermittelt

werden:

$$g_x = 2(q_x q_z - q_w q_y) \quad (2.13a)$$

$$g_y = 2(q_w q_x + q_y q_z) \quad (2.13b)$$

$$g_z = q_w q_w - q_x q_x - q_y q_y + q_z q_z \quad (2.13c)$$

Wenn diese Gravitations-Werte in den jeweiligen Richtungen von den jeweiligen Beschleunigungsdaten⁷ abgezogen werden, liegen die Beschleunigungswerte in gravitationsbefreier Form dar:

$$\text{acc}_x = \text{acc}_{x,in} - g_x \quad (2.14a)$$

$$\text{acc}_y = \text{acc}_{y,in} - g_y \quad (2.14b)$$

$$\text{acc}_z = \text{acc}_{z,in} - g_z \quad (2.14c)$$

Um weiters die Euler-Winkel bestimmen zu können, werden die Quaternionen aus 2.12 und die Gravitationswerte aus 2.13 benötigt:

$$\text{yaw} = \text{atan2}\left(\frac{2q_x q_y - 2q_w q_z}{2q_w q_w - 2q_x q_x - 1}\right) \quad (2.15a)$$

$$\text{pitch} = \text{atan2}\left(\frac{g_x}{\sqrt{g_y^2 + g_z^2}}\right) \quad (2.15b)$$

$$\text{roll} = \text{atan2}\left(\frac{g_y}{\sqrt{g_x^2 + g_z^2}}\right) \quad (2.15c)$$

2.4.2 Bestimmung der Rotationsmatrix

Da die Euler-Winkel in bestimmten Positionen nicht mehr richtig ermittelt werden können (siehe Abschnitt 2.2), bietet sich die Möglichkeit, die Orientierung des Sensors über die Rotationsmatrix zu bestimmen. Diese kann, ebenfalls über die Quaternionen, folgendermaßen ermittelt werden:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 - 2q_y^2 - 2q_z^2 & 2q_x q_y + 2q_w q_z & 2q_x q_z - 2q_w q_y \\ 2q_x q_y - 2q_w q_z & 1 - 2q_x^2 - 2q_z^2 & 2q_y q_z + 2q_w q_x \\ 2q_x q_z + 2q_w q_y & 2q_y q_z - 2q_w q_x & 1 - 2q_x^2 - 2q_y^2 \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Um die Orientierung dieser Rotationsmatrix auf die Ambisonics-Winkel (ψ, θ) umrechnen zu können, werden die Einträge der Rotationsmatrix wie folgt verwendet:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

⁷Diese sind ebenfalls im FIFO-Buffer enthalten, genauso wie die Gyroskopdaten.

$$\psi = \text{atan}\left(\frac{r_2}{r_5}\right)/\pi * 180 \quad (2.18a)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{r_9}{\sqrt{r_3^2 + r_6^2}}\right)/\pi * 180 \quad (2.18b)$$

Hierbei bezeichnen ψ den Azimut- und θ den Elevationswinkel.

Diese Daten des Beschleunigungssensors werden nun über einen Arduino⁸-Mikrokontroller über eine serielle Schnittstelle zum PC übertragen, um von dort weiterverarbeitet werden zu können.

2.4.3 Positionsbestimmung

Aufgrund der begrenzten Zeit vor der Aufführung beim Steirischen Herbst konnte eine Positionsbestimmung mit dem Quaternionen-Modell nicht realisiert werden. Zur Zeit ist auch kein echtzeitfähiges Projekt bekannt, in dem von einem IMU⁹-Sensor die Positionsdaten berechnet werden können.

Es wurde jedoch ein Projekt gefunden, wo ein IMU-Sensor an einem Fuß befestigt wurde und damit die Position bestimmt wurde. Eine Projektbeschreibung ist hier zu finden: [9]. Sebastian Madgwick entwickelte ein Filter [10], wodurch eine Bias-Kompensation des Gyroskops stattfindet. Weiters wird ganz ähnlich dem Kalman Filter eine Verbesserung der tatsächlichen Orientierung erreicht, die für weitere Berechnungen zwingend notwendig ist. Es soll in einigen Schritten jedoch gezeigt werden, wie aus den Beschleunigungs- und Gyroskop-Daten Rückschlüsse auf die Position des Sensors gezogen werden können:

1. Berechnung der Magnitude der Beschleunigung: $\text{acc}_{mag} = \sqrt{\text{acc}_x^2 + \text{acc}_y^2 + \text{acc}_z^2}$
2. Hochpassfilterung mit sehr niedriger Grenzfrequenz, um Gleichanteil zu entfernen.
3. Tiefpassfilterung bei ca. 800 Hz
4. Bestimmung eines stationären Zustandes, indem sehr kleine Beschleunigungswerte detektiert werden.
5. Verwendung des AHRS¹⁰-Algorithmus von Sebastian Madgwick zur Bestimmung eines Quaternionen-Modells.
6. Ausrichtung des Modells aufgrund der Richtung zur Erde.
7. Umrechnung der Beschleunigungsdaten in m/s^2 .

⁸ist eine aus Soft- und Hardware bestehende Physical-Computing-Plattform welche seit 2005 von Massimo Banzi und David Cuartielles entwickelt wird.

⁹Inertial Measurement Unit

¹⁰Attitude Heading Reference System - Zur Bestimmung der Winkel Yaw, Pitch und Roll.

8. Integration der Beschleunigungsdaten, um Geschwindigkeiten zu erhalten.
9. Drift-Kompensation bei einem stationären Zustand.
10. Integration der Geschwindigkeitsdaten, um Positionen zu erhalten.

Dieses Filter zur Drift-Kompensation liegt auch als C-Variante vor, was eine Möglichkeit bieten würde, dies auch in Echtzeit zu realisieren. Anstrengungen in diese Richtung wurden bereits getätigt.

2.5 Übertragung zu Max/MSP

Die gesamte Signalverarbeitung, welche die Umrechnung der Quaternionen in die Euler-Winkel beinhaltet, wird am Arduino gemeinsam mit der Bibliothek von Jeff Rowberg gerechnet. Die Übertragung der Daten vom Arduino zu Max/MSP¹¹ basiert auf einer seriellen Verbindung. Bei der Übertragung werden die drei Euler-Winkel, die drei Beschleunigungswerte und die Temperatur jeweils mit einem Leerzeichen getrennt gesendet. In Max werden die Daten mit dem `serial`-Objekt empfangen und aufbereitet, wie in Abbildung 7 zu sehen ist.

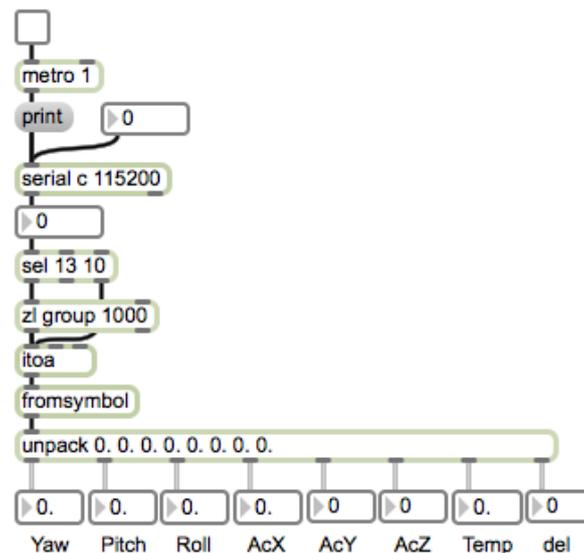


Abb. 7: Empfang der seriellen Daten und Aufbereitung für weitere Verwendung.

Nach dieser Aufbereitung stehen die Daten zur Steuerung der Live-Elektronik wie im nächsten Abschnitt beschrieben bereit.

¹¹ist eine grafische Entwicklungsumgebung für Audio und Videobearbeitung in Echtzeit. Sie wurde Ende der 1980er Jahre von Miller Puckette am IRCAM in Paris entwickelt. Max wurde verwendet, da dieses Programm auch von der Komponistin verwendet wird. Das Senden funktioniert grundsätzlich aber auch mit Pure Data.

3 Künstlerische Verarbeitung der Sensordaten

3.1 Beschreibung der Komposition

Die Komponistin sieht ihre Komposition wie einen schwarzen Körper, der eine gleichförmige Temperatur erreicht und gleichzeitig ein charakteristisches Spektrum emittiert, welches lediglich von der Temperatur abhängig ist. *Radiazione di corpo nero* wird nach der Schwarzkörperstrahlung benannt.

Dieser schwarze Körper wird dabei als klangliche Strahlungsquelle über das Instrument (Flügel) gemeinsam mit der Elektronik dargestellt. Der Klang des Flügels wird über zwei Mikrophone im Computer prozessiert, transformiert und mittels Mehrkanal-Tonsystem über die Lautsprecher ausgestrahlt. Dabei sind die Prozesse der Elektronik abhängig von der Temperatur des Pianisten, welche mittels Sensor während der Aufführung gemessen und an den Computer übermittelt wird. Diese Parameter wie der Winkel der linken Hand des Pianisten verändern den Klang des Flügels in Echtzeit.

Das Stück beinhaltet insgesamt acht Teilstücke, die auch als musikalische Räume bezeichnet werden können. Die Komposition ist dabei von den Planck-Einheiten inspiriert. Im Zuge der experimentelle Arbeit werden verschiedene Möglichkeiten, den Flügel als Resonanzkörper zu verwenden, erforscht. Dies basiert auf einer Interaktion zwischen Instrument, Gestus, Musik und Raum. [2]

Abbildung 8 soll dies anhand des Bühnenplans der Komponistin verdeutlichen.

3.2 Planck Einheiten und Bezeichnung der acht Teilstücke

1. Density (Elektronik + Resonanzkörper des Flügels)
2. Pressure
3. Mementum
4. Acceleration
5. Energy
6. Power
7. Force
8. Angular Frequency

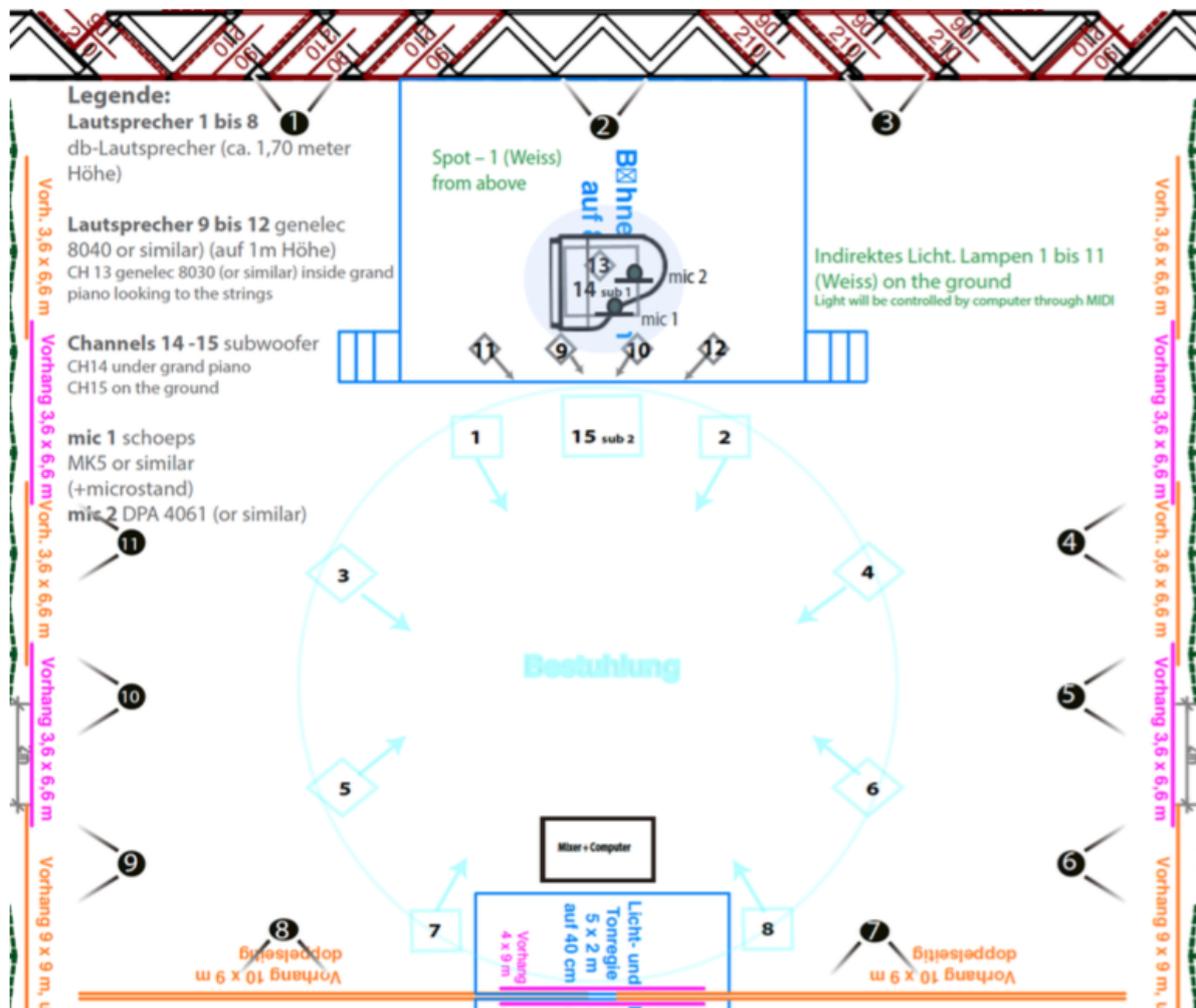


Abb. 8: Setup der Komposition für die Helmut List Halle in Graz. Gut zu sehen der Flügel auf der erhöhten Bühne, bestückt mit zwei Mikrofonen und vier Lautsprechern in die Mitte des Raumes gerichtet. Das Publikum in der Mitte des Raumes umringt von acht Lautsprechern. Die schwarzen Kreise am Rand des Raumes sollen die Positionen des Lichts markieren, welches ebenfalls Teil des Stückes ist. [2]

3.3 Steuerung der Elektronik mit den Sensor Daten

Die Komponistin verwendet einen eigens geschriebenen Max-Patch der insgesamt sieben Sektionen und 33 Events enthält, bei denen zwischen und während des Stückes hin- und hergeschaltet wird. Als Echtzeit-Prozessoren wurden folgende Module verwendet:

- Als Klangquelle dienen die Mikrophone am Flügel und gespeicherte Klänge vom Computer
- Spektrale Analysemethoden zur Transformation in den spektralen Bereich und zur Resynthese

- Modulationstechniken: Amplitudenmodulation AM und Frequenzmodulation FM
- Granulare Synthese
- Mikrotonale Transposition unter der Verwendung der FFT und der Sensorsignale
- Time-Stretching und Freezing
- Spatialisierung im Mehrkanal-System unter der Verwendung von Ambisonics
- Andere Prozessierungs-Tools wie Kompression, Hall und Equalizer
- Echtzeit-Kontrolle der Lichtsteuerung mit MIDI bezüglich des musikalischen Abschnittes

Die vom Sensor gelieferten Daten wurden von der Komponistin selbst gemappt und den jeweiligen Modulen zugewiesen. Zum Beispiel wurde die Temperatur verwendet, um mikrotonal zu transponieren. Die Bewegung des Pianisten wurde dazu verwendet, Klang im Raum zu bewegen. Im Speziellen wurde die Bewegung vom linken Rand des Klaviers zur Mitte auf eine Kreisbewegung übertragen, was beim letzten Teilstück *Angular Frequency* benötigt wird. Wie anhand der Partitur in Abbildung 9 zu sehen ist, muss der Pianist seine Hand vom tiefen e in der großen Oktave bis zum zweigestrichenen h bewegen. Dazu wurde zuerst die Position der Hand auf Ausgangsposition gestellt, was einer Null-Setzung des Winkelwertes gleichzusetzen ist, um dann den Bereich bis zum Endwinkel in der Mitte des Klaviers auf eine Kreisbewegung umlegen zu können.

Section 8

1

[Angular Frequency]

♩ = 120

mf (*cresc. lentamente ...*)

Ped. \wedge ...

Abb. 9: Auszug aus dem letzten Teilstück der Partitur. Es ist sehr gut zu sehen, dass der Pianist eine Bewegung vom linken Rand des Klaviers (*e* der großen Oktave) bis zur Mitte (*d'*) machen muss. [2]

4 Ausblick

Winfried Ritsch arbeitet derzeit am Institut an einer Bibliothek, wo bereits eine Verbindung über Wifi mit dem Sensor möglich ist. Dieser kann auch mit einem Akku betrieben werden, um eine kabellose Verbindung mit einem Musiker zu ermöglichen. Es soll in des weiteren auch an einer Echtzeitspositionsbestimmung weitergearbeitet werden. Dadurch würde sich im Gegensatz zu einer Positionsbestimmung über Kameras ein erheblich geringerer Kostenfaktor ergeben.

Literaturverzeichnis

- [1] MPU6050. <http://playground.arduino.cc/Main/MPU-6050>, 2016.
Aufgerufen am 28. April 2016.
- [2] Teresa Carrasco. *la radiazione di corpo nero - for piano and live electronics*. 2015.
Partitur.
- [3] Andrew Hanson J. *Visualizing Quaternions*. The Morgan Kaufmann Series in Interactive 3D Technology. Elsevier Science, 2006.
- [4] Steirischer Herbst. *Broschüre Musikprotokoll*. 2015.
- [5] Kuipers Jakc B. *Quaternions and Rotation Sequences*. Princeton Paperbacks, 1999.
- [6] Florian Krebs. Schlagzeug als Hyperinstrument mit kabellosen Beschleunigungssensoren. Toningenieur Projekt - IEM Graz, 2009.
- [7] Andreas Kugi. Automatisierung - Fachvertiefung. Vorlesungsskript - TU Wien, 2015/16.
- [8] Thilo Leschke, Katrin und Steinkrauß. Quaternionen: von hamilton, basketällen und anderen katastrophen.
- [9] Seb Madgwick. Gait tracking with x-IMU. <http://x-io.co.uk/gait-tracking-with-x-imu/>, 2013.
Aufgerufen am 28. April 2016.
- [10] Sebastian Madgwick. An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays. Internatl Report - Department of Mechanical Engineering, University of Bristol, 2011.
- [11] Joseph Paradiso, Kai-Yuh Hsiao, and Eric Hu. *Interactive Music for Instrumented Dancing Shoes*. 1999.
- [12] Jeff Rowberg. I2C device library collection for AVR/Arduino or other C++-based MCUs. <http://github.com/jrowberg/i2cdevlib>, 2016.
Aufgerufen am 28. April 2016.
- [13] Lena Scharz. Quaternionen. Seminararbeit Analysis und Geometrie, 2009.
- [14] Matt Wright. Opensound control specifiction. <http://archive.cnmat.berkeley.edu/OpenSoundControl/OSC-spec.html>, 2016.
Aufgerufen am 27. April 2016.
- [15] Udo Zölzer. *Digital Audio Effects*. 2002.