

目次

1	緒言	2
1.1	背景	2
1.2	目的	3
1.3	研究方針	3
1.4	論文の構成	3
2	概要	4
3	光学式モーションキャプチャについて	5
3.1	カメラとマーカー	5
3.2	キャリブレーション	5
3.3	グランドプレーン	6
3.4	剛体トラッキング	7
4	慣性式モーションキャプチャ	8
4.1	回転の表し方	8
4.1.1	角速度ベクトル	8
4.1.2	オイラー角	8
4.1.3	回転行列	9
4.1.4	クオータニオン	10

令和7年度 卒業論文

光学式モーションキャプチャ補助デバイスの開発

学籍番号 15611
氏名 中野晃聖
所属学科 制御情報工学科
指導教員 内堀晃彥
日付 令和8年1月30日

目次

1 緒言

1.1 背景

近年, モーションキャプチャ技術は, 映像制作, スポーツ科学, 医療・リハビリテーション, ロボティクス, ヒューマンインターフェースなど, 多様な分野において広く利用されている. 人体の動作を三次元空間上で計測し, 骨格モデルや三次元モデルへ反映することにより, アニメーション生成や動作の定量的な評価, 訓練・治療支援の高度化が可能となる.

一方, 近年の動作解析では, 人体の運動だけでなく, 道具操作や手作業を伴う動作の理解が重要視されている. 例えば, 作業支援ロボットの研究, リハビリテーション動作の評価においては, 人体の動きに加え, 手に持つ工具や操作対象といった小型物体の運動を同時に計測することが求められる. このような小型物体を含めた動作計測は, 動作全体の因果関係や操作意図を理解する上で重要な要素である [@vanani2025mesquite] [@twist].

モーションキャプチャには複数の方式が存在するが, 代表的なものとして光学式モーションキャプチャが挙げられる. 光学式モーションキャプチャは, 複数台のカメラによりマーカーを撮影し, その三次元座標を算出することで, 高精度な絶対座標および姿勢情報を取得できるという利点を有する [@OptiTrackBaseKnowledge] [@spiceMocapAll]. しかし, 小型物体を対象とした場合, 十分な数のマーカーを配置することが困難であることや, 手や身体による遮蔽の影響を受けやすいことから, 安定した計測が困難となる. その結果, 小型物体の姿勢情報を欠損しやすく, 連続的な動作解析が妨げられるという課題が存在する [@spiceMocapAll].

これに対し, 慣性式モーションキャプチャは加速度センサおよびジャイロセンサを内蔵した IMU を対象に装着し, センサの情報から姿勢変化を推定する方式である. 慣性式は遮蔽物の影響を受けにくく, センサを装着可能であれば連続的に姿勢変化を取得できるため, 小型物体の計測に適している. 一方で, 角速度の時間積分による姿勢推定では誤差が蓄積しやすく, 長時間計測において姿勢の信頼性が低下するという問題がある [@intertialMoCapMerit].

光学式モーションキャプチャと慣性式モーションキャプチャを併用する研究事例 [@OpticalAndInertialMoCap] [@MultiSensorHumanGaitDataset] は存在するものの, 多くは人体動作の補完を主目的としたものであり, 小型物体の動作計測を主目的として統合的に設計されたシステムは十分に検討されていない.

1.2 目的

光学式モーションキャプチャによって得られる高精度な絶対座標・姿勢情報を基準とし、慣性式モーションキャプチャによって得られる相対的な回転情報を組み合わせることで、両方式の欠点を相互に補完する統合的な計測環境を構築できれば、従来手法よりも高精度かつ安定したモーションキャプチャの実現が期待される。

本研究では、この考え方に基づき、光学式モーションキャプチャを基準とし、慣性式モーションキャプチャの手法を組み合わせた小型補助デバイスの開発を目的とする。

1.3 研究方針

本研究では、光学式モーションキャプチャシステムである OptiTrack と連携可能な小型補助デバイスを Seeed Studio XIAO nRF52840 を用いて開発する。本デバイスは小型物体への装着を想定した小型・軽量構成とし、搭載した IMU から小型物体の姿勢変化を推定する。

取得された小型物体の相対的な姿勢情報を、光学式モーションキャプチャによって得られる人体の絶対座標・姿勢情報と統合することで、小型物体を含めた動作を同一座標系上で扱う計測システムを構築する。これにより、遮蔽やマーカー制約によって光学式のみでは取得が困難であった小型物体の動作情報を補完する。

1.4 論文の構成

本論文の構成を以下に記す。

2 概要

本研究で開発するシステムは、光学式モーションキャプチャシステム OptiTrack と、IMU を搭載した小型補助デバイスを統合した構成である。光学式モーションキャプチャから取得される絶対座標・姿勢情報を親データ、補助デバイスから取得される相対的な姿勢変化を子データとして扱い、両者を同一の時間軸上で結合することで、小型物体を含めた動作計測を実現する。

補助デバイスには、3 軸加速度センサおよび 3 軸ジャイロセンサを内蔵した Seeed Studio XIAO nRF52840 を採用した。本デバイスは小型・軽量であり、小型物体への装着に適している。センサから取得した角速度および加速度データに対し、相補フィルタを用いた姿勢推定処理を施することで、ジャイロセンサのドリフト誤差を抑制しつつ、動的な姿勢変化を追従可能とした。

OptiTrack と補助デバイス間のデータ同期には、OptiTrack の eSync2 から出力される同期パルスを利用した。受信側デバイスがパルスを検知するたびにシーケンス番号をカウントアップし、このシーケンス番号を補助デバイスとの通信に付加することで、光学式と慣性式の両データを同一フレーム上で対応付ける。補助デバイスとの通信には Bluetooth Low Energy (BLE) を使用し、取得したデータはシリアル通信を介して PC へ転送される。

PC 上では、OptiTrack から取得したモーションデータと補助デバイスから取得した姿勢データをシーケンス番号に基づいて統合し、Unity を用いて三次元空間上に可視化する。これにより、光学式モーションキャプチャでは取得困難であった小型物体の姿勢情報を、人体の動作と同一座標系上で表示することが可能となる。

3 光学式モーションキャプチャについて

3.1 カメラとマーカー

光学式モーションキャプチャは、複数台の専用カメラを用いて対象の動きをキャプチャする。光学式モーションキャプチャのカメラは、赤外線を発光するストロボライトが内蔵されている。対象に取り付けるマーカーは、受けた光を直線で反射させる塗料を塗られた反射マーカーが使用される。これは、光は通常乱反射するため光源に到達する光量は小さくなるため、入射する光源の方向にのみ光を返すことによって、強い光量を保つためである [@OptiTrackMarker].

カメラから赤外線を発光し、反射した光をカメラで撮影することで、カメラから平面として見えるマーカーの座標が二次元座標で取得される。キャリブレーションにより、複数台のカメラの互いの座標と角度が定義され、キャリブレーション情報と各カメラの各マーカーに対する二次元座標をもとに、三次元座標を計算する。そのため、各マーカーは複数台のカメラのうち少なくとも 2 台以上のカメラから見えていることが必要となる [@OptiTrackBase].

3.2 キャリブレーション

光学式モーションキャプチャは三角測量の原理を用いて座標推定を行う。ある時刻において、カメラ A およびカメラ B の両方に同一のマーカーが観測されたとする。このとき、各カメラからマーカーに向かってレイ A およびレイ B が空間中に投射される。理想的にはこれら 2 本のレイは一点で交差するが、実際には観測誤差の影響により完全には交差しない。そのため、レイ A とレイ B の距離が最も近くなる点をマーカーの 3 次元座標として推定する。しかし、この手法を適用するためには、各カメラの座標および姿勢が既知である必要がある。そこで、事前にキャリブレーションを行う [@OptiTrackQuickGuide].

キャリブレーションとは、複数台のカメラ間の相対的な座標および姿勢、焦点距離などの内部パラメータ、ならびに空間座標系における原点および座標軸の定義を行う処理を指す。本研究で使用する OptiTrack Prime 17W は、ダイナミックキャリブレーションと呼ばれる手法によってキャリブレーションが行われる [@OptiTrackQuickGuide].

動作範囲内でマーカーを捉えることのできる座標にカメラを複数台設置し、キャリブレーションワンドと呼ばれる 3 つのマーカーが一列に配置されている機器（図 1）を用いてキャリブレーションを行う。キャリブレーションワンドに設置されたマーカーには中央のマーカーと、それぞれ距離の異なるマーカーが左右に 1 つずつ設置されている。機器を動作範囲内の空間中で動かすことで、各カメラのマーカーに関する

る 2D 座標が記録されていく。この時取得されたデータをもとに、各カメラのマーカーに対するレイが求められる。キャリブレーションワンド上にあるマーカー間の既知の距離関係を使用し、複数時刻にわたるデータ全体に対して再投影誤差が最小となるように最適化を行うことで、3D 空間上におけるカメラ同士の相対的な座標および姿勢が推定される。この手法のことをバンドル調整 (Bundle Adjustment) という [@triggs1999bundle] [@OptiTrackDoc_calibrate] [@OptiTrackBase] (図 2)。



図 1: キャリブレーションワンド

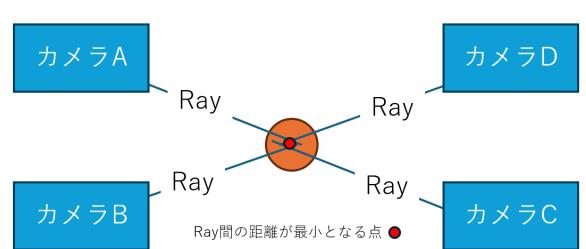


図 2: 三次元座標の求め方

3.3 グランドプレーン

グランドプレーンとは、計測空間における基準平面を定義する処理であり、通常は床面に対応する平面が設定される。グランドプレーンを設定することで、ワールド座標系の原点座標および各座標軸の向きが決定され、取得された三次元座標データを物理空間と対応づけることが可能となる [@OptiTrackQuickGuide] [@OptiTrackBase]。

グランドプレーンスクエアと呼ばれる機器 (図 3) を原点としたい座標に設置し、複数のマーカーの三次元座標情報を用いることで、床面を一つの平面として推定する。この平面は、各マーカー座標に最も一致するように計算される。このとき、グランドプレーンスクエア上のマーカーが示す方向を Z 軸(床面に対する垂直方向)として定義される。ここで定義された原点および座標軸に基づき、キャリブレーションによって得られたカメラ間の相対座標関係が再調整される。これにより、モーションキャプチャの環境が整備される。 [@OptiTrackDoc_calibrate]。



図 3: グランドプレーンスクエア

3.4 剛体トラッキング

光学式モーションキャプチャでは、対象物体に 3 点以上のマーカーを取り付け、それらを一つの剛体 (Rigid Body) (図 4) として定義することで、物体の座標および姿勢を推定する手法が用いられる。

まず、各マーカーの三次元座標は複数カメラによる三角測量によって算出される。次に、マーカー間の相対座標関係が時間的に変化しないという仮定のもと、これらのマーカー群を一つの剛体として扱う。各時刻におけるマーカー配置と基準配置との対応関係から、剛体の並進および回転が推定される。これを剛体トラッキングと呼ぶ [@OptiTrackDoc_rigidbody]。

剛体が定義されたとき、どのマーカーがどの剛体に対応するかに加え、各マーカー間の距離や相対的な配置から求められる剛体の形状が保存される。それ以降は、このマーカー間の距離と剛体の形状に一致するものをフレームごとに探索することで、どのマーカーが剛体に対応するかを決定する。その後、剛体の重心を計算し、この重心とともに各フレームごとに剛体をどれほど移動させ、回転させるべきかを計算する [@fomula-rigid]。

これにより、対象物体の座標と姿勢が推定される。

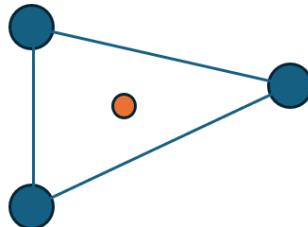


図 4: 剛体のイメージ図

4 慣性式モーションキャプチャ

4.1 回転の表し方

4.1.1 角速度ベクトル

角速度ベクトル ω とは、現在どの軸の周りにどれくらいの速さで回転しているかを示すベクトル(式 1)であり、回転運動を 3 つの軸成分に分解して表現したものである。その大きさは回転速度を、向きは回転軸を表す(図 5)。

例えば、 $\omega = [1, 0, 0]$ のとき、x 軸周りに 1[rad/s] で回転していることを意味する。慣性式モーションキャプチャなどでは、IMU の出力データを表現する際に用いられる。

$$\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z] [\text{rad/s}] \quad (1)$$

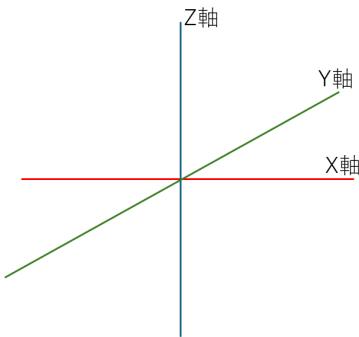


図 5: 角速度ベクトルのイメージ図

4.1.2 オイラー角

オイラー角とは、回転を 3 つの角度によって表現する方法であり、物体の姿勢を直感的に理解しやすいという特徴を持つ姿勢表現法である。一般に、回転はあらかじめ定められた 3 軸に対して順番に行われ、各回転角の組によって姿勢が定義される。

代表的な表現として Z-Y-X 系(図 6)があり、これは z 軸周りの回転を Yaw (図 7)、y 軸周りの回転を Pitch (図 8)、x 軸周りの回転を Roll (図 9)とし、この順に回転を適用するものである。

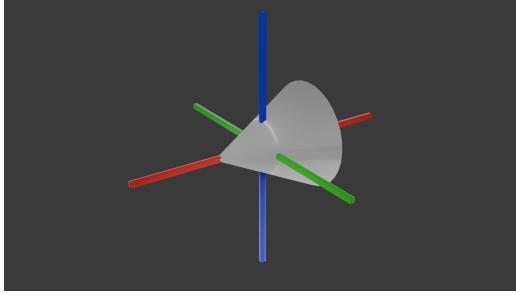


図 6: 初期状態

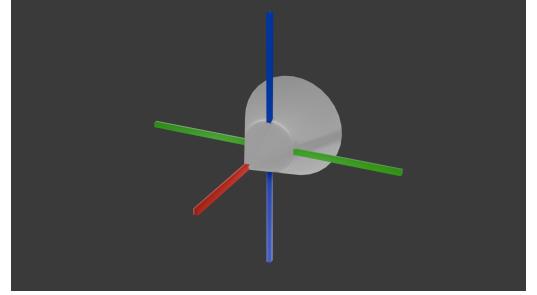


図 7: Z-Yaw 回転

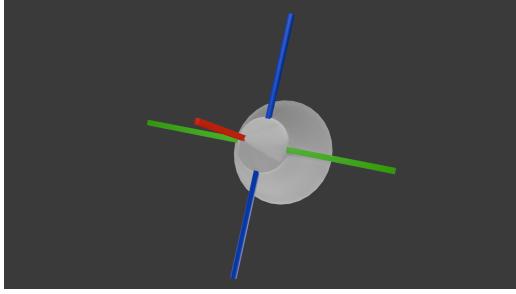


図 8: Y-Pitch 回転

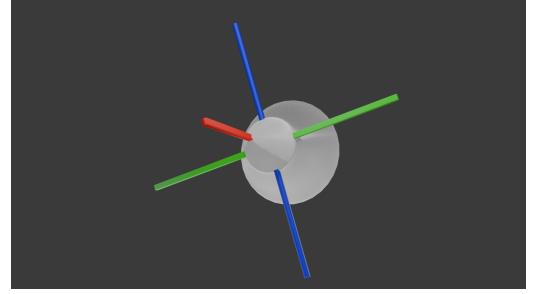


図 9: X-Roll 回転

オイラー角は、3つのパラメータのみで姿勢を表現できるため計算量が少ないという利点を有する。一方で、特定の姿勢において自由度が失われるジンバルロックと呼ばれる問題が発生するという欠点がある。

オイラー角は $\theta = (\phi, \theta, \psi)$ [rad] として表す。ここで、 ϕ は Roll 角、 θ は Pitch 角、 ψ は Yaw 角を表す。

$\theta = (0, \frac{\pi}{2}, 0)$ のとき、 ϕ および ψ の値にかかわらず、物体座標系の X 軸は固定座標系の Z 軸と平行となる。この状態では、 ϕ と ψ はいずれも Z 軸周りの回転にのみ寄与し、他の方向への回転を表現することができなくなる。このように回転の自由度が1つ失われる姿勢を特異姿勢と呼び、この現象をジンバルロックという。

4.1.3 回転行列

回転行列とは、姿勢を線形変換として表現する方法であり、座標変換の観点から姿勢を厳密に記述できる姿勢表現の方法である。

回転行列は 3×3 の正方行列で表され、物体座標系から固定座標系への変換、あるいはその逆変換に用いられる。

回転行列 \mathbf{R} は以下の性質を満たす直交行列である（式 2）。ここで、 \mathbf{I} は単位行列を表す。

$$\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}, \det(\mathbf{R}) = 1 \quad (2)$$

x,y,z 各軸周りの回転行列は次のように定義される。

x 軸周りの回転行列 (式 3)

$$\mathbf{R}_x(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \quad (3)$$

y 軸周りの回転行列 (式 4)

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (4)$$

z 軸周りの回転行列 (式 5)

$$\mathbf{R}_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

これらは、それぞれ対応する軸を中心として反時計回りに回転させる変換を表す。

Z-Y-X 系オイラー角を用いる場合、回転行列は各軸回転行列の積として表される (式 6).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\psi)\mathbf{R}_y(\theta)\mathbf{R}_x(\phi) \quad (6)$$

このとき、回転行列の適用順序は右から左であり、x-Roll 軸回転、y-Pitch 軸回転、z-Yaw 軸回転の順で適用される。この回転行列を用いることで、オイラー角の姿勢を特異点無しで表現可能である。一方、9 つの要素を保持しなければならず、メモリ効率が悪くなる。

4.1.4 クォータニオン

クォータニオンは、三次元空間における回転を 4 つの実数成分によって表現する姿勢表現法である (式 7)。オイラー角や回転行列と同様に物体の姿勢を表すことができるが、特異点 (ジンバルロック) を持たず、数値的に安定であるという特徴を有する。

$$q = \omega + xi + yj + zk \quad (7)$$

ここで、 ω は実部、 x, y, z は虚部、 i, j, k は基本虚数単位である。虚数単位の性質として (式 8) がある。

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \quad (8)$$

クォータニオンは (式 9) としても表すことができる。

$$\begin{aligned} q &= (\omega, \mathbf{v}) \text{ただし } \mathbf{v} = (x, y, z) \\ q &= (\omega, x, y, z) \end{aligned} \tag{9}$$

ここで、 ω は実部スカラーで、 \mathbf{v} は虚部三次元ベクトルである。

回転を表す単位クオータニオンは(式10)の形を持つ。

$$q = \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right), u_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), u_y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), u_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \tag{10}$$

ここで、 θ は回転角で、 $u = (u_x, u_y, u_z)$ は回転軸(単位ベクトル)である。

三次元ベクトル \mathbf{v} を回転させる場合は(式11)という形で回転をさせる。

$$\mathbf{v}' = q\mathbf{v}q^{-1} \tag{11}$$

ここで、 $\mathbf{v} = (0, v_x, v_y, v_z)$ で純虚クオータニオンである。

具体例として、 z 軸周りに 90° 回転させる場合と、 x 軸周りに 90° と z 軸周りに 90° 回転させる場合を考える。

z 軸周りに 90° 回転させる場合、回転軸は $u = (u_x, u_y, u_z) = (0, 0, 1)$ で、回転角は $\theta = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ である。

回転クオータニオンは(式12)となり、逆クオータニオンは(式13)となる。

$$\begin{aligned} q &= \left(\cos\left(\frac{\theta}{2}\right), u_x \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), u_y \sin\left(\frac{\theta}{2}\right), u_z \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \\ \frac{\theta}{2} &= 45^\circ \\ \cos 45^\circ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \sin 45^\circ &= \frac{\sqrt{2}}{2} \\ q &= \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2} \right) \end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned} q^{-1} &= (\omega, -x, -y, -z) \\ q^{-1} &= \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, 0, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right) \end{aligned} \tag{13}$$

今回回転させるベクトルが x 軸方向のベクトルとする場合 $\mathbf{v} = (1, 0, 0)$ となり、クオータニオンで記すと $v = (0, 1, 0, 0)$ となる。

回転は $v' = qvq^{-1}$ で計算できる.

クオータニオン積の公式として (式 14) がある.

$$(a, \mathbf{A})(b, \mathbf{B}) = (ab - \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}, a\mathbf{B} + b\mathbf{A} + \mathbf{A} \times \mathbf{B}) \quad (14)$$

この公式より qv は (式 15) のように計算される.

$$\begin{aligned} q &= (\omega, \mathbf{v}) = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, (0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2})\right) \\ v &= (\omega, \mathbf{v}) = (0, (1, 0, 0)) \\ &\cdot \text{実部} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 0 - (0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}) \cdot (1, 0, 0) &= 0 \quad (15) \\ &\cdot \text{ベクトル部} \\ \frac{\sqrt{2}}{2}(1, 0, 0) + 0 + (0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}) \times (1, 0, 0) \end{aligned}$$

同様に $(qv)q^{-1}$ を計算すると (式 16) となる.

$$v' = (0, 0, 1, 0) \quad (16)$$

この結果より, ベクトル \mathbf{v} は $(0, 1, 0)$ となる. 元のベクトル \mathbf{v} は $(1, 0, 0)$ であったため, x 軸ベクトルは z 軸周りに 90° 回転し, y 軸方向へ移動したといえる.

同様に x 軸周りに 90° と z 軸周りに 90° 回転させる場合を考える.

x 軸周り 90° のクオータニオンを q_x としたとき, クオータニオンは (式 17). z 軸周り 90° のクオータニオンを q_z としたとき, クオータニオンは (式 18) となる.

$$q_x = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}, 0, 0\right) \quad (17)$$

$$q_z = \left(\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, 0, \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \quad (18)$$

$x \rightarrow z$ の順で合成するとき, 合成クオータニオンは $q = q_z q_x$ となる. 合成すると (式 19) となる.

$$\begin{aligned} q &= q_z q_x = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}\right) \\ (\omega, x, y, z) &= (0.5, 0.5, 0.5, 0.5) \quad (19) \end{aligned}$$

回転したいベクトルを $v = (0, 1, 0)$ としたとき, 純虚クォータニオンは $\mathbf{v} = (0, 0, 1, 0)$ である. これをもとに計算すると (式 20) となる.

$$\mathbf{v}' = q\mathbf{v}q^{-1} = (0, 0, 1) \quad (20)$$

このように, クォータニオンはオイラー角と異なり, 現在の角度から一つの軸をもとにどれほど回転させればよいかを計算し, その間を直線的に補完することで, 一度の回転で済むようにし, かつ自然な動きとなる.

オイラー角は図 10~図 13 のような順番で回転する.

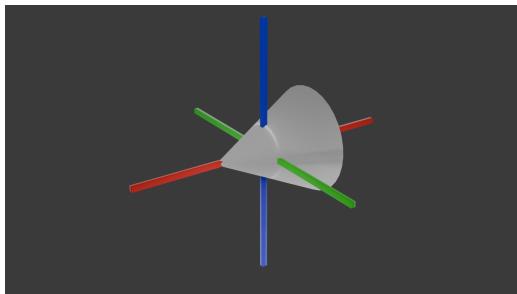


図 10: 初期状態

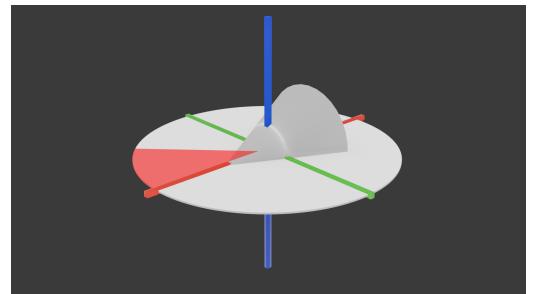


図 11: 1.Z-Yaw 軸に回転

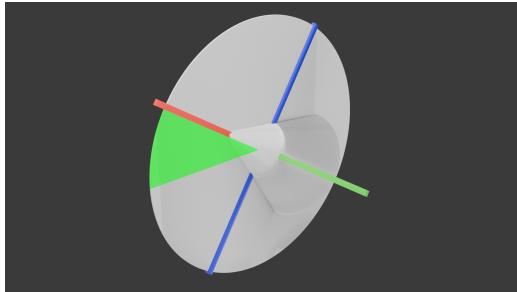


図 12: 2.Y-Pitch 軸に回転

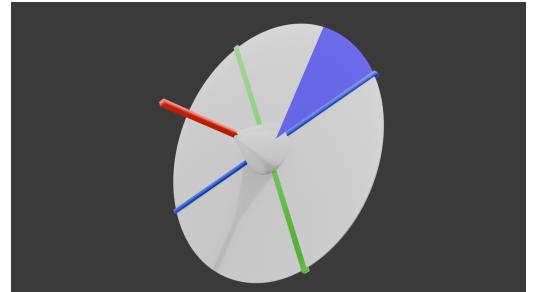


図 13: 3.X-Roll 軸に回転

一方, クォータニオンは図 14~図 16 のように, 一つの軸をもとに回転する.

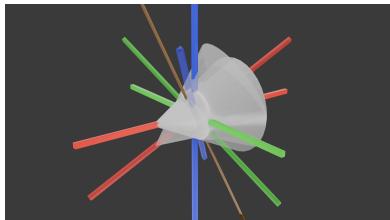


図 14: 初期状態

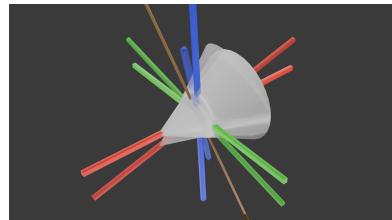


図 15: 回転途中

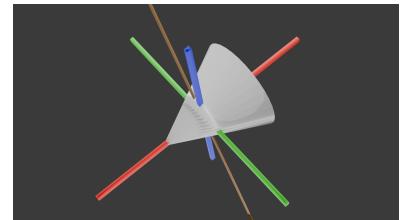


図 16: 回転終了