



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • [Электронная библиотека](#)

[Препринты ИПМ](#) • [Препринт № 43 за 2021 г.](#)



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

[А.В. Подопрсветов,](#)
[А.П. Алисейчик,](#) [И.А. Орлов,](#)
[С.П. Ребрик](#)

Алгоритм калибровки группы
MIMU датчиков

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Алгоритм калибровки группы MIMU датчиков / А.В. Подопрсветов [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2021. № 43. 16 с.
<https://doi.org/10.20948/prepr-2021-43>
<https://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2021-43>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

А.В. Подопросветов, А.П. Алисейчик, И.А. Орлов,
С.П. Ребрик

Алгоритм калибровки
группы МІМУ датчиков

Москва – 2021

УДК 531.13

Подопросветов А.В., Алисейчик А.П., Орлов И.А., Ребрик С.П.

Алгоритм калибровки группы МИМУ датчиков

Магнитные и инерционные измерительные устройства (MIMU — magnetic and inertial measurement units) становятся популярными в разных областях: спортивных, медицинских, промышленных — благодаря простоте их применения и относительной доступности. В работе предлагается алгоритм калибровки носимых датчиков, основанный на алгебре вращений. Представлена система визуализации кинематики человека, которая восстанавливается по получаемой с датчиков информации.

Ключевые слова: магнитный и инерциальный датчик, кинематика тела человека, кватернион, вращение.

Podoprosvetov Aleksei Valerievich, Aliseychik Anton Pavlovich, Orlov Igor Aleksandrovich, Rebrik Sergei Petrovich. Calibration Algorithm for MIMU Sensors Group

Non-optical wearable sensors, such as magnetic and inertial measuring units (MIMU), are becoming popular in various fields: sports, medical, industrial — due to their ease of use and relative availability. We propose an algorithm for calibrating wearable sensors based on the rotation algebra. A system for visualizing human kinematics, which is reconstructed from MIMUs' data, is presented.

Key words: MIMU, human kinematics, rotation, quaternion.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 18-71-10112).

Введение

В областях, связанных с изучением движений человека, в частности в реабилитационной медицине, в диагностике нарушений двигательной системы человека, в спортивной медицине, в эргономике и охране труда, применяются различные методы, позволяющие регистрировать позу человека в динамике. Рассмотрим наиболее популярные из них.

Широко используются оптические системы, которые отслеживают трехмерное положение маркеров на теле человека с помощью инфракрасных камер. Эти системы делятся на два типа: пассивные и активные. В пассивных системах применяются отражающие маркеры, а в активных — маркеры-излучатели, в которые включены контроллеры управления, необходимые для синхронизации и идентификации.

Также используются системы, где маркерами являются магниты, а измерителями — сенсоры магнитного поля. Положения маркеров вычисляются по искажениям магнитного потока.

Указанные выше технологии обладают высокой точностью измерений (разрешение 0,1 мм) [2]. Однако существует ряд серьезных ограничений, затрудняющих их использование. К ним можно отнести длительное время калибровки камер и ограниченную область измерения, что не позволяет использовать такие системы не в лабораторных условиях.

Еще одним распространенным способом регистрации движений человека является анализ видеоряда с помощью программ, использующих машинное обучение. Ярким примером подобного подхода является система OpenPose [1, 12], которая в реальном времени умеет распознавать ключевые точки на теле человека и по ним строить упрощенную трехмерную модель скелета. К достоинствам данной системы относится возможность поиска неограниченного числа людей в кадре, а также умение распознавать не только человека целиком, но и части его тела (например, кисть руки или лицо), если человек не поместился в кадр полностью. Данная система 3D-распознавания также имеет ограничения при применении не в лабораторных условиях, поскольку требует записи данных одновременно с нескольких камер.

В статье [3] реализован метод восстановления 3D-позы человека по данным с одной камеры, который использует одновременно алгоритмы восстановления 2D-позы человека и оценку глубины изображения. К сожалению, предложенный метод характеризуется невысокой точностью и надежностью распознавания.

В контексте данной работы подробного рассмотрения заслуживает способ регистрации движений человека при помощи набора инерциальных датчиков

(MIMU - magnetic and inertial measurement unit, МИИ - магнито-инерциальный измеритель). МИИ включает три датчика: гироскоп, акселерометр и магнетометр. Используя данные с этих трех датчиков, можно вычислить ориентацию измерителя в пространстве, эта процедура называется (sensor fusion [5]). Измерители выдают свое положение (вращение) относительно глобальной системы координат, задаваемой осями север-юг, верх-низ (как правило, в форме кватернионов). В процессе работы МИИ устройства прикрепляют к различным частям тела испытуемого, и измерители передают информацию о своей ориентации на систему сбора данных. Ведущим коммерческим производителем систем на МИИ сенсорах является компания XSens [7], [6]. Открытого кода программного обеспечения системы она не предоставляет. Ориентируясь на указанные публикации, можно сделать вывод, что для восстановления кинематики движения разработчики используют не только информацию об ориентации, но и интегрируют показания акселерометров для отслеживания различных типов движений, включая прыжки, движение по лестнице, смещение в пространстве относительно начальной точки и т.д.

Для определения ориентации частей тела (сегментов) по ориентации прикрепленных к ним МИИ датчиков необходимо провести процесс калибровки, т.е. найти вращение каждого измерителя относительно соответствующего сегмента. В статье [9] приводятся сравнительный анализ алгоритмов калибровки и их верификация. Авторы определяют три типа калибровки: технический, статический и функциональный — и проводят сравнение алгоритмов калибровки с использованием МИИ XSens для верхней части тела человека. Для измерения «реальных» положений сегментов использовалась оптоэлектронная система Eagle 4 компании Motion Analysis Corporation. Точность измерения углов запястья, локтя и плечевого сустава оценивались по двум критериям: достоверность (близость к системе отсчета) и точность (воспроизводимость).

Подробный обзор алгоритмов калибровки описан в работе [10]. В статье описана проблема недостатка методических работ, позволяющих воспроизвести описываемые способы калибровки, а также проблема оценки точности алгоритмов. Авторы указывают на то, что разработчики используют разные протоколы оценки качества своих методов, что делает практически невозможным их сравнение. Таким образом, для использования предлагаемых методов для конкретного приложения необходимо провести их апробацию и сравнение с использованием одного протокола.

Задача восстановления движений человека с использованием инерциальных датчиков является весьма актуальной с практической точки зрения. В данной работе предлагается алгоритм калибровки системы инерциальных датчиков, который применим в полевых условиях, а также рассмотрена его

реализация. Алгоритм калибровки, представленный в данной работе, строго не классифицируется, он схож со статическими методами калибровки, но при этом учитывает движение человека, что дает возможность крепить датчики в произвольном месте на сегменте тела человека. В заключении предлагаются способы улучшения алгоритма и расширения области его применения. Код программной реализации алгоритма на языке Python приводится в [11].

1. Описание задачи

Для описания положения и движения сложного объекта, такого как человек, необходимым условием является построение его модели. Будем рассматривать движения как движения упрощенной модели человека. Скелет человека состоит из костей, соединенных суставами. При моделировании каждая кость рассматривается как твердое тело без деформаций. Такие простые твердые тела могут быть описаны связанными с ними системами координат. Сложные тела строятся путем объединения нескольких простых тел фиксированными поворотными шарнирами, которые соответствуют суставам человека.

Алгоритм калибровки, являющийся основным результатом настоящей работы, не зависит от выбора модели. Поэтому без ограничения общности для простоты представления и описания алгоритма будет использоваться модель из пункта 4.2.

В настоящей работе ставится задача отображения модельной системы в соответствии с реальным миром по данным инерциальных датчиков.

Существует два подхода к интерпретации кинематики. Первый заключается в поиске и точном позиционировании осей всех сегментов модели и человека для восстановления его движений. Второй — в восстановлении всех углов между сегментами многозвенной модели.

Будем предполагать, что система датчиков закреплена на человеке жестко, т.е. не изменяет своего положения относительно тела человека, и используем первый подход.

2. Обозначения

Системы координат (СК) будем обозначать буквой F . Переход из одной СК в другую описывается оператором поворота R (мы не учитываем перенос). Переход из F_a в F_b будем обозначать как bR_a . Последовательность трех вращений можно представить как ${}^fR_e \cdot {}^dR_c \cdot {}^bR_a$. Вращение, обратное bR_a , обозначим как ${}^bR_a^{-1}$. Отметим, что ${}^bR_a^{-1} = {}^aR_b$, а

также что ${}^c R_a = {}^c R_b \cdot {}^b R_a$.

Мы будем рассматривать следующие положения тела:

Npose — ноги вместе, руки по швам,

Tpose — ноги вместе, руки разведены в стороны,

Cpose — некоторое положение в данный момент времени.

Вращение, соответствующее определенному положению, записывается как ${}^b R_a(\text{pose})$.

Для систем координат будем использовать следующие обозначения:

F_{glob} — глобальная СК.

F_{seg} — СК связанная с определенной частью тела.

F_{seg_imu} — СК связанная с датчиком прикрепленным к определенной части тела.

Вращение может быть представлено в виде матрицы поворота (M), а также в виде кватерниона (Q). Индексы при M и Q аналогичны индексам при R .

Например:

${}^{seg} M_{glob}$ — матрица перехода из глобальной системы координат в систему координат связанную с определенной частью тела.

${}^{arm} Q_{arm_imu}$ — кватернион задающий вращение из системы координат связанной с датчиком на руке в систему координат руки.

На рисунке 2.1 приведен пример расположения различных СК.

3. Алгоритм калибровки

3.1. Входные данные

MIMU датчик включает в себя трёхосевой акселерометр, трёхосевой гироскоп и трёхосевой магнитометр. На основании данных, полученных с этих устройств, вычислительный модуль датчика рассчитывает ${}^{imu} R_{glob}$ — вращение локальной СК, связанной с датчиком F_{imu} , относительно глобальной СК F_{glob} .

Заметим, что данные с датчиков поступают в виде кватернионов и считаются известными, но все выкладки мы приводим в общем виде, во вращении. Так как в предложенном алгоритме основную роль играют всего два датчика расположенные на двух частях тела, алгоритм описывается для двух датчиков, однако при выполнении пункта 3.3 для дополнительных датчиков, алгоритм применим к моделям любой сложности.

Без потери общности будем считать, что в глобальной СК ось \vec{y} направлена вверх, что соответствует СК, используемой по умолчанию в OpenGL и других системах визуализации. В СК тела ось \vec{y} также направлена вверх

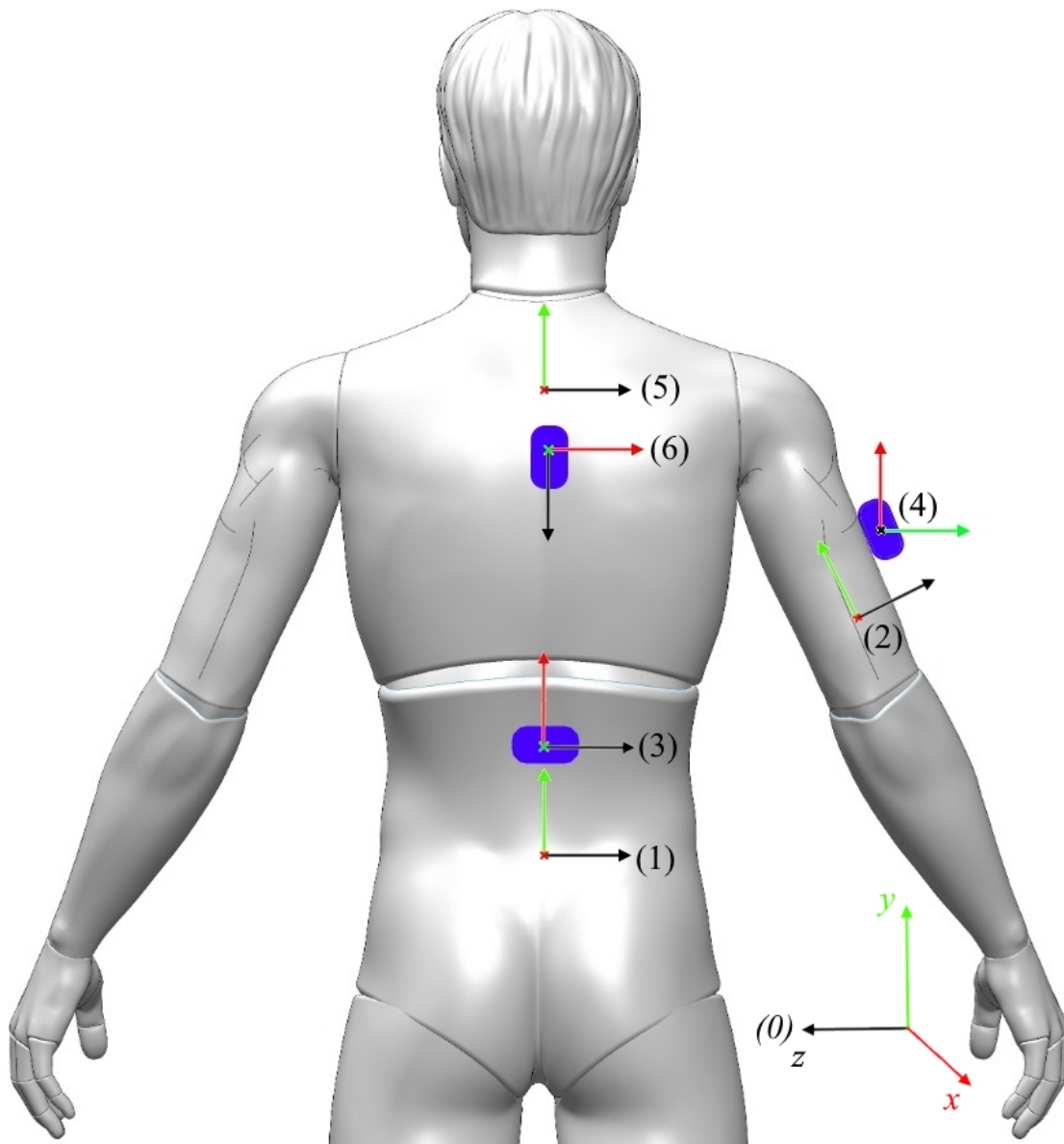


Рис. 2.1. Синим цветом обозначены *MIMU*-сенсоры прикрепленные к телу. Цифрами обозначены системы координат:

- (0) – глобальная СК F_{glob} ,
- (1) – СК, связанная с телом человека F_{body} ,
- (2) – СК, связанная с рукой человека F_{arm} ,
- (3) – СК, связанная с датчиком на пояснице человека F_{body_imu} ,
- (4) – СК, связанная с датчиком на руке человека F_{arm_imu} ,
- (5) – СК, связанная с плечевым поясом F_{back} ,
- (6) – СК, связанная с датчиком на плечевом поясе F_{back_imu}

относительно тела, а ось \vec{x} – вперед.

Заметим: в данном алгоритме фиксируются место крепления каждого датчика к части тела и взаимная ориентация датчиков. Эти данные считаются известными и фиксированными вместе с ориентацией относительно части тела, однако неважно положение точки крепления и неважна начальная ори-

ентация датчика – она считается в ходе калибровки.

3.2. Построение системы координат, связанной с телом человека

На первом этапе калибровки мы определяем ориентацию СК тела F_{body} в глобальном пространстве. Это реализуется с помощью двух датчиков. Без ограничения общности по пункту 3.1 введем системы координат на теле человека (рис. 2.1), связанные с поясницей F_{body} (система координат тела) и с плечом F_{arm} таким образом, чтобы в положении N -поза они совпадали с точностью до плоскопараллельного сдвига. Далее для определенности в данной работе будем считать, что первый датчик находится на пояснице человека, второй — на плече. Будем обозначать СК, связанные с этими датчиками, как F_{body_imu} F_{arm_imu} соответственно. Данные, получаемые с этих датчиков, запишем как ${}^{body_imu}R_{glob}$ и ${}^{arm_imu}R_{glob}$. Заметим, что в общем виде датчики могут находиться на любых частях тела и достаточно того, чтобы части тела друг относительно друга имели объем движения не менее 90 градусов.

Будем рассматривать две позы: N -поза — «руки по швам» — руки вытянуты вдоль туловища от плеч к ступням, при этом плоскость ладони параллельна сагиттальной плоскости человека, и T -поза — руки разведены в стороны, при этом направление большого пальца коллинеарно направлению взгляда человека «вперед».

Сначала человек принимает N -позу, и мы снимаем показания всех датчиков. Показания первого и второго выделенных датчиков задают два вращения: ${}^{body_imu}R_{glob}(Npose)$ и ${}^{arm_imu}R_{glob}(Npose)$. Далее человек переходит из N -позы в T -позу, и снимаются показания датчика на руке в T -позе: ${}^{arm_imu}R_{glob}(Tpose)$. Два положения руки формируют фронтальную плоскость, соответствующую плоскости, в которой происходило движение руки. Ясно, что сагиттальная плоскость (плоскость симметрии человека) перпендикулярна фронтальной и в ней лежит вектор, параллельный оси вращения руки. Поворот руки из N -позы в T -позу можно выразить через показания датчиков руки:

$${}^{arm_imu_T}R_{arm_imu_N} = {}^{arm_imu}R_{glob}(Tpose) \cdot {}^{arm_imu}R_{glob}(Npose)^{-1}. \quad (3.1)$$

Осям системы координат тела ${}^{body}R_{glob}$ соответствуют вектора $\{\vec{x}_b, \vec{y}_b, \vec{z}_b\}$. Представим вращение ${}^{arm_imu_T}R_{arm_imu_N}$ как кватернион в виде $[w, i, j, k]$,

$$[w, i, j, k] = {}^{arm_imu_T}Q_{arm_imu_N}, \quad (3.2)$$

Его мнимая часть $[i, j, k]$ будет осью вращения, которая коллинеарна оси \vec{x}_b . Вектор оси вращения необходимо нормировать и представить в глобальной

системе координат:

$$\vec{x}_b = {}^{arm_imu}R_{glob}(Npose)^{-1} \cdot UnitVector \begin{pmatrix} i \\ j \\ k \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

В качестве оси \vec{y}_b мы берем вертикальную ось

$$\vec{y}_b = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (3.4)$$

но в выкладках мы используем общий вид: \vec{y}_b .

Заметим, что человек не может сделать поворот руки в строго вертикальной плоскости, вследствие чего оси \vec{x}_b и \vec{y}_b не перпендикулярны. Поэтому необходимо произвести корректировку путем вычитания из вектора \vec{x}_b его вертикальной составляющей и нормирования результата.

$$\vec{x}_b = UnitVector(\vec{x}_b - \frac{(\vec{x}_b, \vec{y}_b)}{|\vec{x}_b|} \vec{y}_b). \quad (3.5)$$

Ось \vec{z}_b определяется через \vec{x}_b и \vec{y}_b как:

$$\vec{z}_b = \vec{x}_b \times \vec{y}_b. \quad (3.6)$$

Таким образом, можно получить представление СК тела в глобальной СК, составив матрицу вращения из векторов–столбцов $\vec{x}_b, \vec{y}_b, \vec{z}_b$.

$${}^{body}M_{glob} = (\vec{x}_b, \vec{y}_b, \vec{z}_b). \quad (3.7)$$

3.3. Определение положения датчиков относительно частей тела

Для определения положения частей тела по прикрепленным к ним датчикам необходимо знать ориентацию датчиков относительно соответствующих частей тела. Для датчика, закрепленного на пояснице, это вращение рассчитывается по формуле:

$${}^{body}R_{body_imu} = {}^{body}R_{glob} \cdot {}^{body_imu}R_{glob}^{-1}(Npose), \quad (3.8)$$

здесь ${}^{body}R_{glob}$ дается выражением (3.7).

Положение СК частей тела F_{seg} относительно СК тела F_{body} в N -позе ${}^{seg}R_{body}(Npose)$ определяется кинематикой человека, и мы можем рассчитать положение всех остальных датчиков используя следующее выражение:

$${}^{body}R_{seg_imu} = {}^{body}R_{glob} \cdot {}^{seg_imu}R_{glob}^{-1}(Npose), \quad (3.9)$$

$${}^{seg}R_{seg_imu} = {}^{seg}R_{body}(Npose) \cdot {}^{body}R_{seg_imu}. \quad (3.10)$$

Заметим, что положение датчиков относительно соответствующих частей тела может быть любым, но фиксированным для каждой калибровки.

3.4. Определение текущего положения частей тела

Имея полученные выше данные, можно рассчитать положение частей тела относительно глобальной СК в произвольной позе $Cpose$:

$${}^{body}R_{glob}(Cpose) = {}^{body}R_{body_imu} \cdot {}^{body_imu}R_{glob}(Cpose). \quad (3.11)$$

$${}^{seg}R_{glob}(Cpose) = {}^{seg}R_{seg_imu} \cdot {}^{seg_imu}R_{glob}(Cpose). \quad (3.12)$$

Положение частей тела относительно СК тела рассчитывается следующим образом:

$${}^{seg}R_{body}(Cpose) = {}^{seg}R_{glob}(Cpose) \cdot {}^{body}R_{glob}^{-1}(Cpose). \quad (3.13)$$

4. Практическое применение

Рассмотренный алгоритм калибровки был опробован в системе сбора и визуализации данных, описанной ниже.

4.1. Система сбора данных

Архитектура системы сбора данных состоит из компьютера под ОС *Windows*, набора из десяти МИМУ-датчиков, роутера и системы визуализации. Набор датчиков в своей основе использует промышленные девятиосевые МИМУ-сенсоры BNO055 от компании Bosch. Управление данными с датчиков выполняет двухъядерный микроконтроллер ESP32 с низким энергопотреблением с интегрированным Wi-Fi и Bluetooth контроллерами и антеннами. Система микроконтроллер и датчик работает автономно от Li-ion аккумулятора емкостью 800mAh. Данного аккумулятора хватает на 8 часов непрерывной работы датчика. На данном этапе исследований данные с датчиков собираются контроллером и отправляются по UDP протоколу по Wi-Fi сети через роутер на компьютер. Перед сбором данных проходит процесс синхронизации времен между каждым датчиком и компьютером, при котором считается время прохождения сигнала между ними.

4.2. Описание модели для визуализации

Нами используется упрощенная модель тела человека, состоящая из десяти звеньев: четыре звена моделируют руки человека (плечо и предплечье, без

учета кистей рук), другие четыре звена моделируют ноги человека (бедро и голень, без учета стопы) и два звена — позвоночник (плечевая и поясничная области). Каждое звено соединяется с предыдущим сферическим шарниром. Датчики находятся в заранее известных точках на теле человека в соответствии с звеньями модели, пример расположения датчиков изображен на рисунке 2.1.

4.3. Система визуализации данных

Система визуализации написана на языке Python с использованием библиотек PyQT5 - (кроссплатформенный фреймворк) и VTK - (открытая кроссплатформенная библиотека для трёхмерного моделирования, обработки изображений и прикладной визуализации). В системе визуализации за основу принята система координат в OpenGL (спецификация, определяющая платформонезависимый программный интерфейс для написания приложений, использующих двумерную и трёхмерную компьютерную графику). В глобальной системе координат, по умолчанию используемой в BNO055, ось \vec{z} направлена вверх, противоположно вектору гравитации, а ось \vec{y} направлена на север. Такая же система координат используется во многих других MIMU датчиках. В системе визуализации удобнее работать в СК, применяемой в OpenGL: ось \vec{y} направлена вверх, а ось \vec{z} направлена на камеру, поэтому мы переводим данные приходящие с датчиков в СК OpenGL, используя следующую матрицу поворота:

$$OpenGL M_{BNO055} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

В системе визуализации используются два режима отображения: в СК, связанной с телом человека, когда фигура все время повернута лицом к камере, и в глобальной СК, когда поворот тела отображается на экране. Для второго варианта отображения дополнительно к процессу калибровки можно ввести процесс нормировки, который приводит откалиброванное положение модели в глобальной модельной системе координат F_{scene_glob} к начальному.

После проведения калибровки и нормировки были получены вращения ${}^{body}R_{glob}$ и ${}^{seg}R_{glob}$, соответственно выражения (3.11) и (3.12).

$${}^{scene_body}R_{glob}(Cpose) = {}^{body}R_{glob}(Cpose) \cdot {}^{body}R_{glob}(Npose)^{-1}, \quad (4.2)$$

$${}^{scene_seg}R_{glob}(Cpose) = {}^{seg}R_{glob}(Cpose) \cdot {}^{seg}R_{glob}(Npose)^{-1}. \quad (4.3)$$

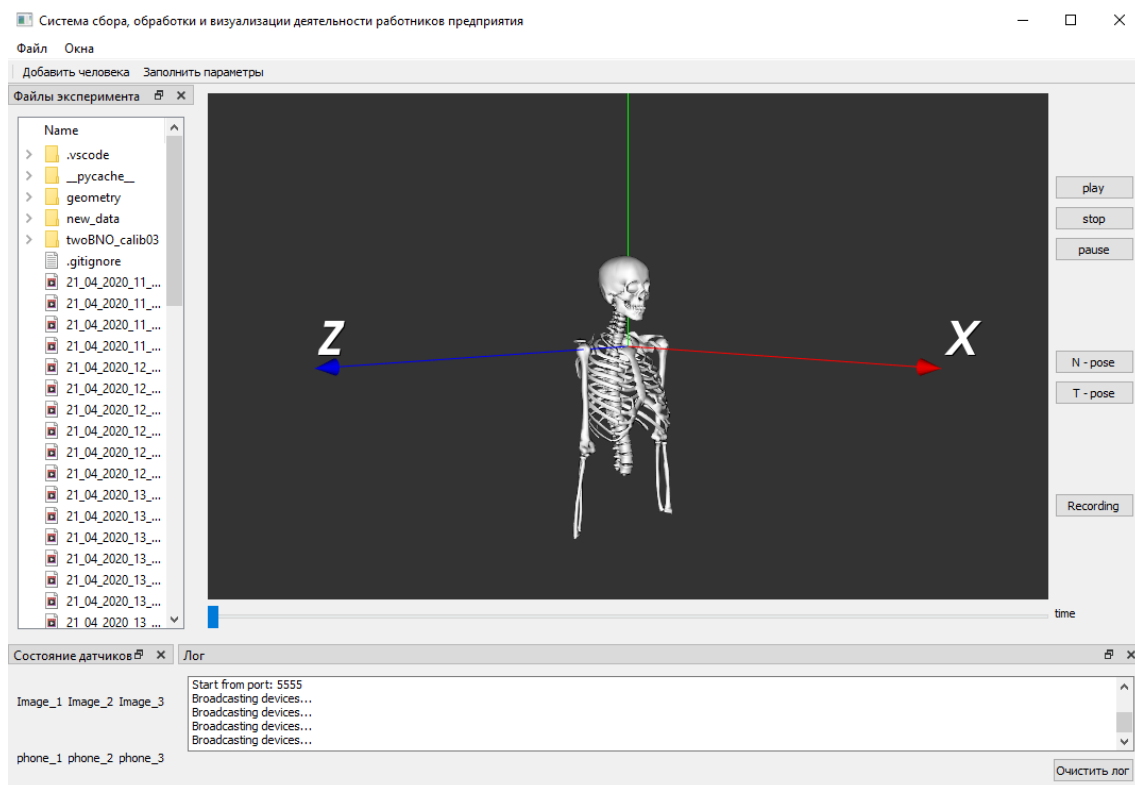


Рис. 4.1. Внешний вид системы визуализации

Таким образом, результаты выражений 4.2 поступают как входные данные ориентаций систем координат тела и всех его сегментов. Внешний вид приложения представлен на рисунке 4.1, а открытый код доступен на сайте [11]. Приложение обрабатывает данные, получаемые с датчиков параллельными процессами, синхронизирует их и отображает на модели.

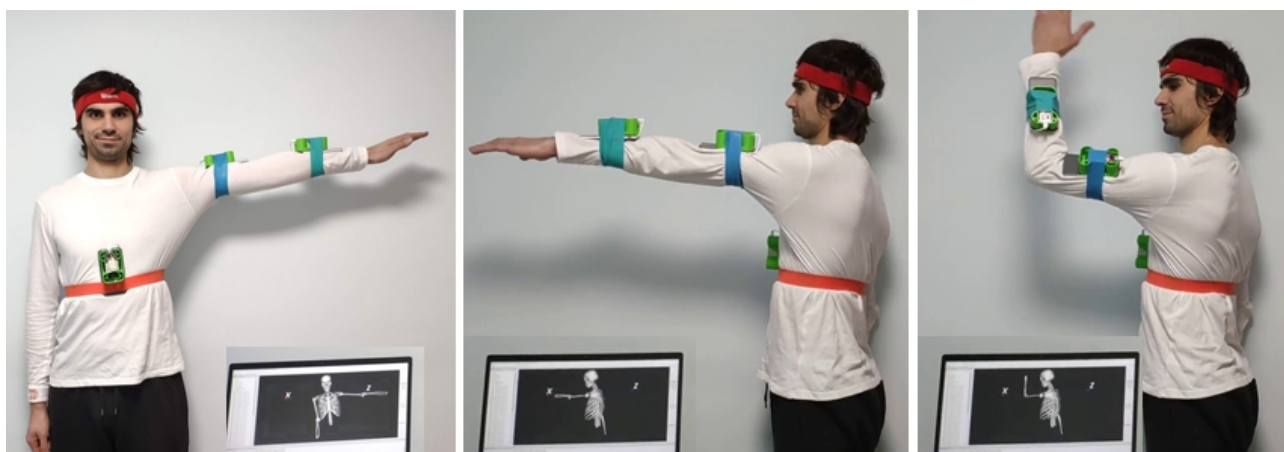


Рис. 4.2. Иллюстрация работы калибровки и визуализации

Демонстрация работы откалиброванной программы приведена на рисунке 4.2.

5. Выводы

В работе был предложен алгоритм калибровки носимых датчиков, основанный на алгебре вращений. Представлена программная система визуализации кинематики человека. А также аппаратная реализация системы для восстановления кинематики человека по получаемой с датчиков информации.

6. Обсуждение

Существует множество вариантов усовершенствования алгоритма калибровки. Однако авторами выбраны следующие приоритетные направления развития. Предлагается брать не частные значения кватернионов в той или иной позе, как описано в алгоритме, а их усредненные значения за короткий промежуток времени. Данное усовершенствование касается как поворота руки, так и закрепленного на поясице опорного датчика для системы координат связанной с телом человека. Для улучшения показателей точности этой СК предлагается использовать две руки вместо одной и считать вектор оси поворота руки не по двум точкам, а по всему возможному множеству точек, записанных в момент калибровки.

Ясно, что использование десятизвенной древовидной системы для определения движений человека накладывает существенные ограничения на последующее восстановление движений человека. Тем не менее это масштабируемая система. В данной работе представлено решение задачи без учёта истинной сложности суставов человека. Понятно, что из-за гибкости и биомеханических ограничений фактическое движение не описывается жесткой моделью, поскольку не учитывает упругости суставов. В дальнейшем будут рассмотрены другие модели человека. Планируется добавить абсолютное положение человека в пространстве путем интегрирования данных с датчиков и учета внешнего контакта с использованием анализа ускорений для ограничения ошибки интегрирования. Также планируется добавление сложной модели сустава плеча и ее коррекция за счет интегрирования данных с датчиков (гироскопа и акселерометра), используя соединение в шарнирах для ограничения дрейфа датчиков.

Список литературы

1. *Z. Cao, G. Hidalgo Martinez, T. Simon, S. Wei, Y. A. Sheikh, OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields // IEEE*

Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2019. No 1. Pp. 75–77.

2. *A. Cappozzo, F. Catani, U. Della Croce, A. Leardini*, Position and orientation in-space of bones during movement—Anatomical frame definition and determination. // Clin. Biomech. 1995. 10. Pp. 171–178.
3. *X. Zhou, Q. Huang, X. Sun, X. Xiangyang, Y. Wei*, Towards 3D Human Pose Estimation in the Wild: A Weakly-Supervised Approach // The IEEE International Conference on Computer Vision. 2017 (arXiv:1704.02447).
4. *W. Ilewicz, A. Nawrat*, Direct Method of IMU Calibration // In: Nawrat A., Simek K., Świerniak A. (eds) Advanced Technologies for Intelligent Systems of National Border Security. Studies in Computational Intelligence. 2013. Vol 440. Springer. Berlin. Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31665-4_13.
5. MathWorks, Sensor Fusion and Tracking Toolbox: IMU Sensor Fusion with Simulink (R2021a). 2012.
6. Patent No.: US 8,165,844 B2, 24.04.2012. Motion Tracking System. <https://patents.google.com/patent/US8165844B2/en>
7. *D. Roetenberg, H. Luinge, P. Slycke*, Xsens MVN: Full 6DOF human motion tracking using miniature inertial sensors. // Xsens Motion Technol. BV Tech. Rep. 3. 2009.
8. Официальный сайт компании Xsens Technologies B. V. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://www.xsens.com/motion-capture>
9. *B. Bouvier, S. Duprey, L. Claudon, R. Dumas, A. Savescu*, Upper Limb Kinematics Using Inertial and Magnetic Sensors: Comparison of Sensor-to-Segment Calibrations // Sensors (Basel). 2015. 15(8):18813-33. <https://doi.org/10.3390/s150818813>.
10. *L. Pacher, C. Chatellier, R. Vauzelle, L. Fradet*, Sensor-to-Segment Calibration Methodologies for Lower-Body Kinematic Analysis with Inertial Sensors: A Systematic Review // Sensors 2020. 20. 3322. <https://doi.org/10.3390/s20113322>.
11. GitHub — веб-сервис для хостинга IT-проектов и их совместной разработки. Электронный ресурс. Режим доступа: https://github.com/llecxis/Example_IMUCalib
12. GitHub — веб-сервис для хостинга IT-проектов и их совместной разработки. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://github.com/CMU-Perceptual-Computing-Lab/openpose>

Содержание

Введение	3
1. Описание задачи	5
2. Обозначения	5
3. Алгоритм калибровки	6
3.1. Входные данные	6
3.2. Построение системы координат, связанной с телом человека	8
3.3. Определение положения датчиков относительно частей тела	9
3.4. Определение текущего положения частей тела	10
4. Практическое применение	10
4.1. Система сбора данных	10
4.2. Описание модели для визуализации	10
4.3. Система визуализации данных	11
5. Выводы	13
6. Обсуждение	13
Список литературы	13