
Моделирование и визуализация траекторий гибо трубы с помощью МЭМС-датчика

Е Тет Линн, Хтет Сое Паинг, Чжо Сое Вин

*Национальный исследовательский университет «Московский Институт
Электронной Техники»*

Аннотация: В данной работе предлагаются моделирование и визуализация траекторий движения трубы в трубогибочном станке. Представлены математические уравнения для преобразования данных кватерниона в угловые данные Эйлера. В работе используется метод двойного интегрирования на данных ускорения от МЭМС-датчика IMU-9250 для получения реалистичных скорости и местоположения. Реализована программа в среде MATLAB для визуализации траекторий движения трубы в 3-d представлении.

Ключевые слова: траектория движения объекта, устройства инерциального измерения, МЭМС.

1. Введение

Технология свободной гибки значительно отличается от обычного метода гибки труб тем, что в этом процессе не требуется менять гибочную матрицу при изменении радиуса изгиба. На рис.1 показана модель системы свободного изгиба.

В процессе гибки труба проталкивается через гибочную матрицу со скоростью V . В то же время сферический подшипник перемещается вдоль заданного направления в плоскости X/Y . Движение сферического подшипника приводит к тому, что гибочная матрица вращается вокруг направляющей. Направляющий аппарат остается неподвижным в течение всего процесса и предназначен для управления углом наклона гибочной матрицы. Эксцентриситет U создается между центром гибочной матрицы и осью Z в направлении, перпендикулярном оси Z , перемещением сферического подшипника. Величина U определяет радиус изгиба. Вообще говоря, маленький U приводит к большому радиусу изгиба, в то время как большой U приводит к малому радиусу изгиба. Но связь между U и радиусом

изгиба R не является фиксированной. Большое отклонение размеров произойдет, если труба будет согнута в соответствии с математической моделью без учета соотношения $U-R$. Таким образом, необходимо получить точное отношение $U-R$ определенной трубки. Величина U не бесконечна. U_{max} определяется требованиями к качеству формовки труб, так как равномерность толщины стенки и скорость деформации сечения зависят от U . Анализ процесса свободного изгиба показан на рис.2. В процессе гибки внешние силы, действующие на трубу, включают P_u от толкателя и P_L от гибочной матрицы. Изгибающий момент вычисляется по формуле (1) [1]:

$$M = P_u \times V + P_L \times U \quad (1)$$



Рис 1. Модель системы свободного изгиба.

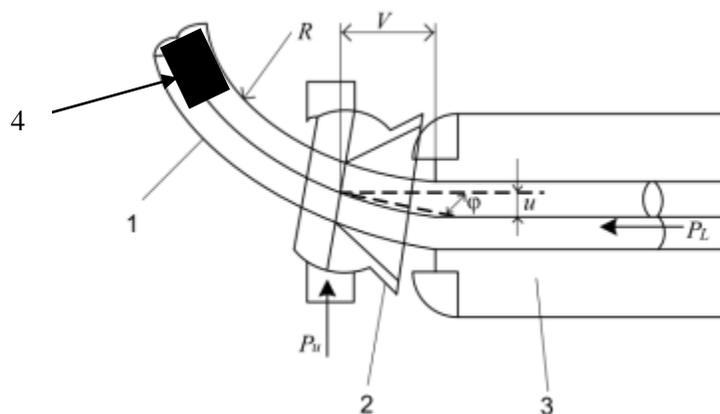


Рис 2. Система свободного изгиба

Отметим, что измерение трехмерных 3-d траекторий с помощью инерциальных измерительных блоков важно также для различных приложений, таких, как крытая пешеходная навигация и счисления координата. Траектория трубы на основе МЭМС датчика обычно реконструируется двойным интегрированием глобального координатного ускорения, при котором накапливаются дрейфы сигналов, приводящие к неограниченному увеличению погрешности. Для отслеживания формовочной трубы при изгибе трубы прикрепляется датчик МЭМС 4 в начале трубы. После этого датчик считывает данные акселерометра и гироскопа и отправляет их в компьютер с помощью беспроводного модуля. Наконец, все данные вычисляются в компьютере и визуализируются, отображая, как труба изменяет форму во времягиба.

2. Математические уравнения для осевого и углового представлений при 3-d вращениях

Преобразование кватерниона в матрицу вращения

Для определения положения твердого тела в трехмерном пространстве обычно существует три варианта: углы Эйлера, кватернионы и матрица косинусов направления (DCM). Они идентифицируют отношения тела с 3 параметрами (Крен, Тангаж, Рыскание), 4 параметрами (q_0, q_1, q_2, q_3), и 9 параметров ($C3*3$) соответственно [2,3].

Учитывая кватернион вращения $q = q_0, q_1, q_2, q_3$, соответствующая матрица вращения имеет вид:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_1q_3 + 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

или:

$$R = \begin{bmatrix} 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_1q_3 + 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & 1 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & 1 - 2q_2^2 - 2q_3^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Оба метода работают для всех допустимых кватернионов единичного вращения, включая тождественный кватернион.

Учитывая матрицу вращения R:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Следующие уравнения показывают, как преобразовать кватернионы в углы Эйлера:

$$\text{Крен} = u = \tan^{-1}\left(\frac{2(q_0q_1 + q_2q_3)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2}\right) = \text{atan2}[2(q_0q_1 + q_2q_3), q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2] \quad (5)$$

$$\text{Тангаж} = v = \sin^{-1}(2(q_0q_2 + q_1q_3)) = \text{asin}[2(q_0q_2 + q_1q_3)] \quad (6)$$

$$\text{Рыскание} = w = \tan^{-1}\left(\frac{2(q_0q_3 + q_1q_2)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2}\right) = \text{atan2}[2(q_0q_3 + q_1q_2), q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2] \quad (7)$$

Уравнения 5 - 7 являются общим решением для извлечения углов Эйлера из кватерниона. Но в частном случае, когда угол тангажа равен $+90^\circ$ или -90° , аргументы для 5 и 7 будут равны нулю, для них функция $\text{atan2}()$ не определена. Это называется "блокировка вращения." Так происходит потому, что при углах тангажа $+90^\circ$ и -90° оси вращения рыскания и крена совпадают друг с другом в мировой системе координат и, следовательно, производят одинаковый эффект. Это означает, что однозначного решения не существует: любая ориентация может быть описана с помощью бесконечного числа комбинаций углов рыскания и крена. Чтобы справиться с условием

блокировки карданного подвеса, нужно сначала использовать уравнение 6, чтобы определить, является ли угол тангажа $+\pi/2$ или $-\pi/2$ радианами. Затем устанавливается крен на ноль, а рыскание по следующей схеме [4]:

Если Тангаж = $+\frac{\pi}{2}$ (в радианах)	Если Тангаж = $-\frac{\pi}{2}$ (в радианах)
Крен = 0	Крен = 0
Рыскание = $-2atan2(q_1, q_0)$	Рыскание = $2atan2(q_1, q_0)$

С помощью двойного интегрирования можно получить сигналы смещения из сигналов ускорения. Однако прямое интегрирование по сигналам ускорения вызовет нереалистичный сдвиг в сигналах скорости и смещения. Причины сдвигов скоростей и перемещений, полученных путем интегрирования сигналов ускорения, можно описать как смещение в ускорениях, случайный шум в ускорениях и т. д. Разумно предположить, что смещение является интегралом скорости, которая, в свою очередь, является интегралом ускорения. Для измеренного ускорения $a(t)$, скорость можно записать в виде:

$$v(t) = v_0 + \int_0^t a(\tau) d\tau \quad (8)$$

где v_0 обозначает начальную скорость. Смещение, являющееся интегральной величиной $v(t)$, выражается как:

$$s(t) = s_0 + \int_0^t v(\tau) d\tau = s_0 + v_0 t + \int_0^t \int_0^\tau a(\tau) d\tau dt \quad (9)$$

где s_0 представляет начальное смещение. Уравнение (2) показывает, что начальная скорость и начальное смещение должны быть известны для оценки смещения для двойного интегрирования, выполняемого при ускорении. Если начальная скорость и начальное смещение равны нулю, то смещение можно определить с помощью уравнения (2). Однако в

большинстве случаев они не равны нулю, что приведет к ошибке интегрирования смещения [5-6].

Моделирование и визуализация для местоположения датчика с использованием акселерометра и гироскопа в 3-d представлении в среде MATLAB

Реконструкция траектории трубы обычно состоит из трех основных процедур: (1) оценка ориентации, (2) оценка скорости, (3) реконструкция траектории. Оценка ориентации интегрирует сигналы гироскопа для получения угловой ориентации каждого IMU. Оценка скорости сначала использует ориентацию IMU выше для преобразования показаний акселерометра в абсолютное пространство, затем линейные скорости интегрируются вперед во времени на каждой траектории. Наконец, траектория восстанавливается путем интегрирования линейных скоростей [7]. Для измерительной системы использовался Bluetooth-совместимый коммерческий инерциальный сенсорный блок. Размер датчика составляет 37 мм × 46 мм × 12 мм, а весит он 22 г. Датчик был прикреплен к верхней части трубы, и сигналы датчика при изгибе регистрировались. Диапазоны измерения ускорения и угловой скорости были установлены на $\pm 8 \text{ Г}$ ($G = 9,81 \text{ м/с}^2$) и $2000 \text{ }^\circ/\text{с}$ соответственно. Необработанные сенсорные данные отбирались на частоте 200 Гц [8].

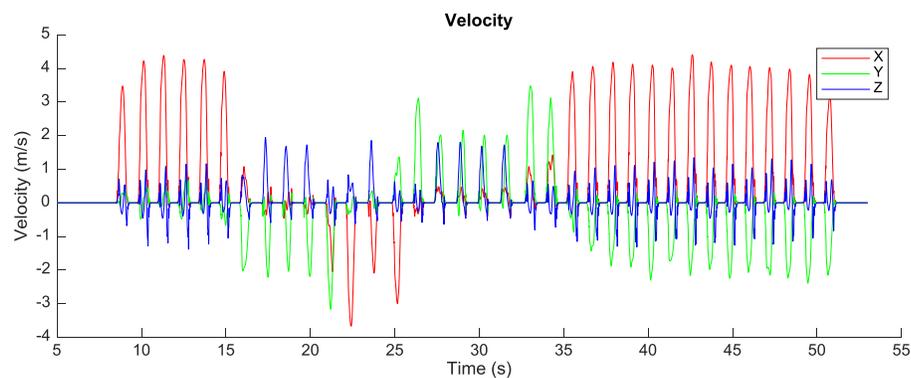


Рис 3. Скорость каждой оси X Y и Z

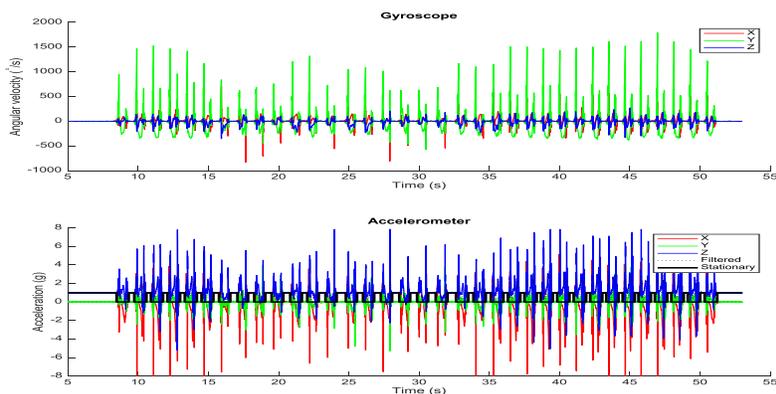


Рис 4. Данные акселерометра и гироскопа по каждой оси X, Y и Z от МЭМС-датчика

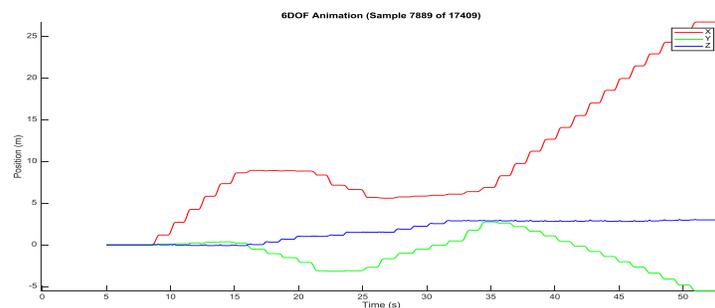


Рис 5. Результаты данных местоположения датчика с помощью акселерометра и гироскопа по каждой оси X, Y и Z

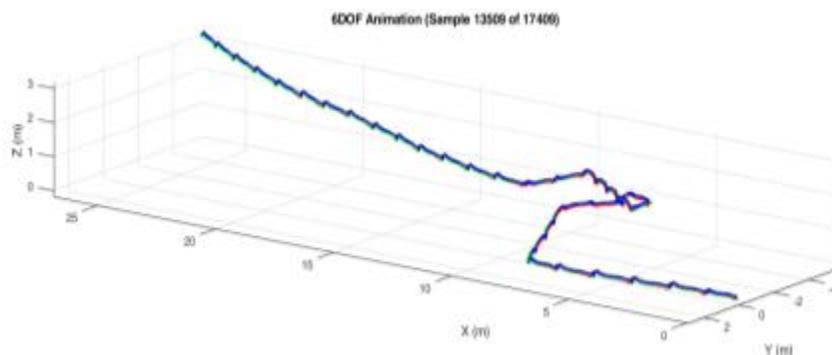


Рис 6. Результаты данных местоположения датчика в 3-d представлении

3. Заключение

В цели работы не входил полный обзор всех алгоритмов, которые могут быть использованы для оценки положения и ориентации МЭМС-датчика. Интегрируя измерения инерциального датчика, можно получить информацию о положении и ориентации датчика. Однако ошибки в измерениях будут накапливаться, и оценки будут дрейфовать. В связи с этим для получения точных оценок положения и ориентации с помощью инерциальных измерений необходимо использовать дополнительные датчики и дополнительные модели. При этом первой задачей будет оценка ориентации с использованием инерциальных и магнитометрических измерений, предполагающая, что ускорение датчика приблизительно равно нулю. Применение магнитометрических измерений устранил дрейф в направлении курса, в то время как предположение, что ускорение приблизительно равно нулю, уберет дрейф в наклоне. Второй рассматриваемой задачей будет оценка позы с использованием инерциальных и позиционных измерений. При применении инерциальных

измерений оценки положения и ориентации связаны, и поэтому измерения положения также дают информацию об ориентации [9,10]. В данной работе полностью показано использование акселерометра и гироскопа для оценки положения и ориентации датчика, а на основе этого исследования уже можно получить траекториюгиба трубы в 3-d представлении.

Литература

1. Щагин А. В., и др. Система управления пространственным гибом труб. Электронные информационные системы. Номер 1(24), 2020. С. 55-62.
2. Guerrero-Castellanos J. F., et al. Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA ' 12), Sanya, China, January 2012. Pp. 1289-1293.
3. Guerrero-Castellanos J. F., et al. Bounded attitude control of rigid bodies: Real-time experimentation to a quadrotor mini-helicopter. Control Engineering Practice. V. 19. No 8. 2011. Pp. 790-797.
4. Rose D. Rotation Quaternions and How to Use Them. URL: danceswithcode.net/engineeringnotes/quaternions/quaternions.html.
5. Gilbert, Hunter B., Ozkan Celik, and Marcia K. O'Malley. Long-term double integration of acceleration for position sensing and frequency domain system identification. In 2010 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, IEEE, 2010. Pp. 453-458.
6. Yang J., Li J.B. & Lin G. A simple approach to integration of acceleration data for dynamic soil–structure interaction analysis. Soil dynamics and earthquake engineering. V. 26. No 8. 2006. Pp. 725-734.



7. Hao M., Chen K., and Fu C. Smoother-based 3-D foot trajectory estimation using inertial sensors. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. V. 66. No. 12. 2019. Pp. 3534-3542.
8. Kitagawa, N. and Ogihara, N., Estimation of foot trajectory during human walking by a wearable inertial measurement unit mounted to the foot. *Gait & posture*. V. 45. 2016. Pp.110-114.
9. Kok M., Hol J.D., & Schön T.B. Using inertial sensors for position and orientation estimation. 2017. arXiv preprint arXiv:1704.06053. URL: arxiv.org/abs/1704.06053.
10. Alandry B., et al. A fully integrated inertial measurement unit: application to attitude and heading determination. *IEEE Sensors Journal*, vol. 11, no. 11, 2011. Pp. 2852– 2860.

References

1. Shchagin A.V., et al. *Elektronnye informacionnye sistemy*, V. 24. No 1, 2020. Pp. 55-62.
2. Guerrero-Castellanos J. F., et al. Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Engineering, Computer Science and Intelligent Systems Design and Engineering Applications (ISDEA ' 12), Sanya, China, January 2012. Pp. 1289-1293.
3. Guerrero-Castellanos J. F., et al. *Control Engineering Practice*. V. 19. No 8. 2011. Pp. 790-797.
4. Rose D. URL: danceswithcode.net/engineeringnotes/quaternions/quaternions.html.
5. Gilbert, Hunter B., Ozkan Celik, and Marcia K. O'Malley. 2010 *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, 2010. Pp. 453-458.



6. Yang J., Li J.B. & Lin G. Soil dynamics and earthquake engineering. V. 26. No 8. 2006. Pp. 725-734.
7. Hao M., Chen K., and Fu C. IEEE Transactions on Biomedical Engineerin. V. 66. No. 12. 2019. Pp. 3534-3542.
8. Kitagawa, N. and Ogihara, N. Gait & posture. V. 45. 2016. Pp.110-114.
9. Kok M., Hol J.D., & Schön T.B. 2017. arXiv preprint arXiv: 1704.06053. URL: arxiv.org/abs/1704.06053.
10. Alandry B., et al. IEEE Sensors Journal, vol. 11, no. 11, 2011. Pp. 2852– 2860.