

# БИАНГУЛЯЦИОННАЯ ГОНИОМЕТРИЧЕСКАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ РОБОТА-ГУМАНОИДА В РОБОФУТБОЛЕ

**А.К. Бабаев**

*Московский физико-технический институт*  
Россия, 141700, Долгопрудный, Институтский пер., 9  
E-mail: 7684067@mail.ru

**С.В. Семендяев**

*Московский физико-технический институт*  
Россия, 141700, Долгопрудный, Институтский пер., 9  
E-mail: semendyaevsergey@gmail.com

**Н.Ю. Коперский**

*Московский физико-технический институт*  
Россия, 141700, Долгопрудный, Институтский пер., 9  
E-mail: koperskij.nyu@phystech.edu

**Ключевые слова:** робототехническая система, локализация, футбол роботов.

**Аннотация:** Разработана мгновенная биангуляционная гониометрическая локализация гуманоидного робота в робофутболе. Локализация основана на использовании инерциального измерительного блока и камеры, находящихся в голове робота – так как это специально сконструировано в роботе RoboKit-MV, разработанном командой Starkit. Получены математические выражения для локализации.

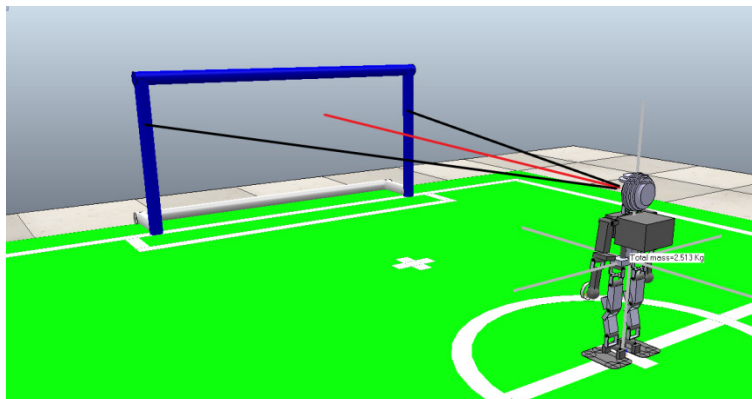
## 1. Введение

Робофутбол – отличная платформа для современного образования [1]. Локализация – одна из основных задач для команд по робофутболу. В литературе по робототехнике есть много статей, посвященных локализации. Мы нашли более 50 статей, рассматривающих эту проблему в робофутболе [2]. Существуют хорошо зарекомендовавшие себя методы локализации, включая фильтр частиц, фильтр Калмана, методы, основанные на графах, и т.д. Но биангуляция для задачи локализации упоминается не так часто [3-5].

Новизна описанного ниже метода заключается в одновременном выполнении трех условий: локализация происходит только по двум ориентирам; робот является гуманоидом; инерциальный измерительный блок (ИИБ) расположен не в теле, как обычно у роботов-гуманоидов в робофутболе, а в голове, там же, где находится и видеочамера компьютерного зрения робота. При этом ИИБ используется как указатель направления, а не только как детектор падения робота. Такого рода конфигурация реализована в RoboKit-MV роботе команды Starkit [6].

В книге [7] описана мгновенная гониометрическая локализация. Этот метод адаптирован нами для решения задачи локализации в робофутболе для робота-гуманоида со специальной конструкцией с ИИБ и видеочамерой в голове.

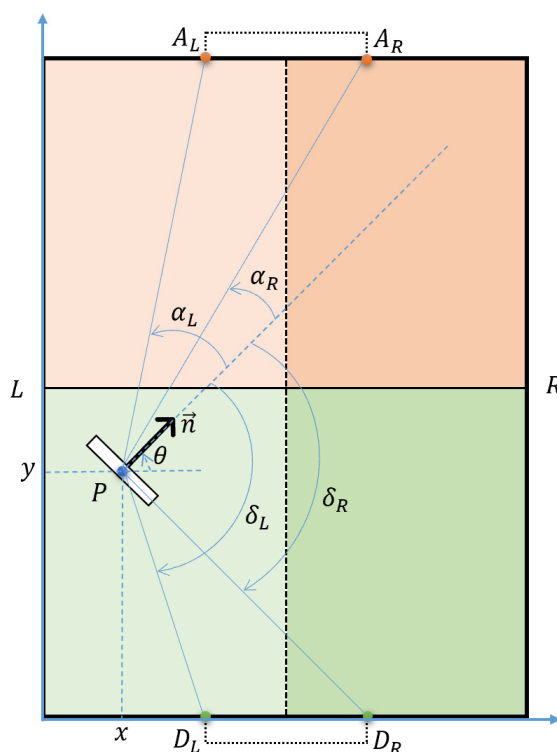
На рис. 1 видно, что левая и правая стойки ворот имеют разные углы относительно сагиттальной оси робота.



**Рис. 1.** Направление сагиттальной оси робота относительно двух направлений стоек ворот (в CoppeliaSim Edu).

Робот не видит другие стойки ворот, поэтому невидимые стойки ворот, находящиеся за спиной, исключаются из задачи мгновенной биангуляции. Всего двух стоек ворот без чего-либо еще в поле зрения робота недостаточно для локализации робота. Тем не менее, дополнительная информация о направлении сагиттальной оси робота, полученная из измерений с помощью ИИБ, размещенного в голове робота, и его угловом положении относительно направлений стоек ворот, может решить проблему гониометрической локализации.

Далее рассмотрим схему поля и робота на рис. 2, где представлен вид сверху.



**Рис. 2.** Схема расположения робота на поле (вид сверху).

На рис. 2 символы имеют следующие значения:

- $P$  – робот-игрок на поле ( $P$  – Player);

- $x, y$  – декартовы координаты, направленные по линии ворот и боковой линии;
- $L, R$  – левая и правая боковые линии (L – Left, R – Right);
- $A_L, A_R$  – левая и правая стойки ворот под атакой (A – Attack);
- $D_L, D_R$  – левая и правая стойки ворот под защитой (D – Defence);
- $n$  – направление сагиттальной оси робота;
- $\theta$  – угол между направлением  $n$  и осью  $x$ ;
- $\alpha_L, \alpha_R, \delta_L, \delta_R$  – углы стоек ворот  $A_L, A_R, D_L, D_R$  относительно  $n$ .

## 2. Биангуляционная гониометрическая локализация

Как правило, в начале игры робот находится вне поля у боковой линии, а вектор  $n$  направлен в поле под углом  $\theta=0$  (мы рассматриваем случай выхода на поле у боковой линии  $L$ ). В то же время робот «знает» об этом, и поэтому любые дальнейшие повороты робота относительно этого направления будут отслеживаться ИИБ.

Хотя в нашей работе датчик ИИБ встроен в голову робота, и голова может поворачиваться относительно тела робота, однако угол поворота головы относительно тела известен из показаний шейного сервопривода. Это означает, что если мы знаем ориентацию тела (а именно, направление сагиттальной оси  $n$ ), тогда мы также знаем ориентацию головы (со встроенной камерой и ИИБ), и наоборот. Ориентации тела и головы имеют взаимно однозначное соответствие.

Когда робот выходит на поле с боковой линии  $L$ , атакуемые стойки ворот находятся под положительными углами  $\theta$  относительно  $n$ , а защищаемые стойки ворот – под отрицательными. Здесь мы придерживаемся правила, что углы, отсчитываемые против часовой стрелки, являются положительными, а по часовой стрелке – отрицательными. При входе из-за боковой линии  $R$  ситуация является аналогичной – защищаемые и атакуемые штанги ворот будут находиться под углами с разными знаками по отношению к  $n$ : но атакуемые – с отрицательными, а защищаемые – с положительными. Мы рассмотрим случай выхода на поле на линии  $L$ . Для линии  $R$  рассуждения и расчеты будут аналогичными, с той лишь разницей, что начальный угол вектора  $n$  будет равен  $\theta=\pi$ , и атакуемые стойки ворот будут находиться под отрицательными углами  $\theta$ , а защищаемые ворота – под положительными.

Рассматриваемый нами набор позиционных меток  $M$  (M – Mark), т.е. объектов на поле с заранее известным положением, состоит из четырех элементов – это позиции стоек ворот:  $M = \{M_L, M_2, M_2, M_3\} = \{A_L, A_R, D_L, D_R\}$ . В принципе, этот набор можно расширить, но в этой статье мы ограничимся только стойками ворот.

Пусть длина боковой линии равна  $a$ , длина линии ворот –  $b$ , расстояние между стойками –  $d$ .

Координаты  $M$ , соответственно, следующие:

$$M_1 = A_L: (x_1, y_1) = \left( \frac{b-d}{2}, a \right),$$

$$M_2 = A_R: (x_2, y_2) = \left( \frac{b+d}{2}, a \right),$$

$$M_3 = D_L: (x_3, y_3) = \left( \frac{b-d}{2}, 0 \right),$$

$$M_4 = D_R: (x_4, y_4) = \left( \frac{b+d}{2}, 0 \right).$$

Хотя количество ориентиров явно больше, чем требуется для задачи биангуляции, мы не исключаем ситуаций, что какая-либо из стоек ворот будет закрыта в поле зрения другим роботом, и, как следствие, количество видимых стоек ворот будет меньше. Кроме того, когда робот атакует, видимыми метками будут только  $A_L, A_R$ . В целом, во

время игры большую часть времени робот-футболист проводит в состоянии, когда видны только две стойки ворот:  $A_L, A_R$ .

Пусть  $m_i$  – вектор, направленный к  $M_i$  из  $P$ :

$$m_i = \overrightarrow{PM_i} = \vec{r}(M_i) - \vec{r}(P).$$

Пусть  $\mu_i$  – угол между  $m_i$  и  $n$ , так что  $\{\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4\} = \{\alpha_L, \alpha_R, \delta_L, \delta_R\}$ .

Как известно [7], два вектора  $n$  и  $m_i$  будут коллинеарными, если:

$$\det[m_i, n] = 0.$$

Отсюда мы получаем:

$$\det \begin{bmatrix} x_i - x & \cos(\theta + \mu_i) \\ y_i - y & \sin(\theta + \mu_i) \end{bmatrix} = 0,$$

$$(x_i - x)\sin(\theta + \mu_i) - (y_i - y)\cos(\theta + \mu_i) = 0.$$

Мы знаем значение  $\theta$ , исходя из измерений ИИБ, так же как углы расположения атакуемых стоек ворот  $\mu_1, \mu_2$  согласно данным, полученным с помощью камеры. Итак, для положения робота  $(x, y)$  мы имеем систему из двух уравнений:

$$\begin{cases} (x_1 - x)\sin(\theta + \mu_1) - (y_1 - y)\cos(\theta + \mu_1) = 0 \\ (x_2 - x)\sin(\theta + \mu_2) - (y_2 - y)\cos(\theta + \mu_2) = 0 \end{cases}$$

Или, в векторно-матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \sin(\theta + \mu_1) & -\cos(\theta + \mu_1) \\ \sin(\theta + \mu_2) & -\cos(\theta + \mu_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1\sin(\theta + \mu_1) - y_1\cos(\theta + \mu_1) \\ x_2\sin(\theta + \mu_2) - y_2\cos(\theta + \mu_2) \end{bmatrix}$$

У системы есть решение, если:

$$\Delta = \det \begin{bmatrix} \sin(\theta + \mu_1) & -\cos(\theta + \mu_1) \\ \sin(\theta + \mu_2) & -\cos(\theta + \mu_2) \end{bmatrix} = \sin(\mu_2 - \mu_1) \neq 0,$$

откуда получаем условие:

$$\mu_2 \neq \mu_1 + \pi k, k \in \mathbb{Z},$$

это означает, что робот не должен находиться на линии ворот, которые он видит.

Итак, если робот находится не на линии ворот, решением задачи его локализации на основе биангуляции будет:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \end{bmatrix},$$

$$\Delta_1 = \det \begin{bmatrix} x_1\sin(\theta + \mu_1) - y_1\cos(\theta + \mu_1) & -\cos(\theta + \mu_1) \\ x_2\sin(\theta + \mu_2) - y_2\cos(\theta + \mu_2) & -\cos(\theta + \mu_2) \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{1}{2} (b\sin(\mu_2 - \mu_1) + d\sin(2\theta + \mu_1 + \mu_2)),$$

$$\Delta_2 = \det \begin{bmatrix} \sin(\theta + \mu_1) & x_1\sin(\theta + \mu_1) - y_1\cos(\theta + \mu_1) \\ \sin(\theta + \mu_2) & x_2\sin(\theta + \mu_2) - y_2\cos(\theta + \mu_2) \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{d}{2} (\cos(\mu_2 - \mu_1) - \cos(\mu_2 + \mu_1)) + a\sin(\mu_2 - \mu_1).$$

Соберем выражения в итоговую формулу локализации.

Учитывая что  $\{\mu_1, \mu_2\} = \{\alpha_L, \alpha_R\}$ , и  $\alpha_R \neq \alpha_L + \pi k$ , где  $k$  – целое число, мы получим координаты робота  $P$ :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sin(\alpha_R - \alpha_L)} \begin{bmatrix} b\sin(\alpha_R - \alpha_L) + d\sin(2\theta + \alpha_L + \alpha_R) \\ d(\cos(\alpha_R - \alpha_L) - \cos(\alpha_R + \alpha_L)) + 2a\sin(\alpha_R - \alpha_L) \end{bmatrix}$$

### 3. Заключение

Разработанный метод биангуляционной гониометрической локализации робота-гуманоида в футбольном матче роботов на основе инерциального измерительного блока и камеры компьютерного зрения, расположенных в голове, обладает следующими преимуществами.

Метод не требует интенсивной обработки видеоизображения с камеры. Вся обработка изображения для локализации связана с двумя стойками ворот (которые представляют собой вертикальные стойки на зеленом футбольном поле). Направления к этим стойкам ворот сравниваются с направлением сагиттальной оси робота, которое может быть получено из данных датчика ИИБ. Локализация происходит мгновенно благодаря биангуляции.

Триангуляция, необходимая для корректировки направления сагиттальной оси робота, в случае если робот падает и встает или если показания ИИБ дрейфуют, будут рассмотрены в отдельной статье.

## Список литературы

1. Gorbachev R., Semendyaev S., Khokhlov I., Litvinenko V., Ryakin I. The robosoccer as a modern educational platform in the field of artificial intelligence // IEEE Proceedings of international conference on artificial intelligence: applications and innovations IC-AIAI-2019. 2019. P. 59-61.
2. RoboCup Symposium Series. URL: <http://robocup.org/symposium> (дата обращения 11.01.2024).
3. Motomura A., Matsuoka T., Hasegawa T. Self-localization method using two landmarks and dead reckoning for autonomous mobile soccer robots // RoboCup Symposium 2003. Heidelberg: Springer, LNCS, 2003. Vol. 3020. P. 523-533.
4. Jungel M., Risler M. Self-localization using odometry and horizontal bearings to landmarks // RoboCup Symposium 2007. Heidelberg: Springer, LNCS, 2007. Vol. 5001. P. 393-400.
5. Ergin Ozkucur N., Levent Akın H. Localization with non-unique landmark observations // RoboCup Symposium 2010. Heidelberg: Springer, LNCS, 2010. Vol. 6556. P. 72-81.
6. Starkit team homepage. URL: <https://starkit.ru> (дата обращения 11.01.2024).
7. Jaulin L. Mobile robotics / 2nd edn. Wiley-ISTE, 2019.