

Manipulation Process Efficiency (MPE)

Бенчмарк эффективности решения задач
манипуляции предметами

НАЗНАЧЕНИЕ

Бенчмарк предназначен для оценки эффективности применения робототехнического комплекса в практических задачах манипуляции предметами по сравнению с другими системами автоматизации (в т.ч. роботизации) или использованием ручного человеческого труда.

Лаборатория робототехники Сбербанка

Декабрь 2020

Содержание

СОДЕРЖАНИЕ	1
БЕНЧМАРК ДЛЯ ТЕХНОЛОГИИ МАНИПУЛЯЦИИ	2
КОЭФФИЦИЕНТ АВТОНОМНОСТИ РОБОТА	3
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТРИКИ	3
КОЭФФИЦИЕНТ ВРЕМЕНИ ОБУЧЕНИЯ НОВОЙ ЗАДАЧЕ	4
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТРИКИ	4
КОЭФФИЦИЕНТ ГРУЗОПОДЪЕМНОСТИ РОБОТА К ЧЕЛОВЕКУ	5
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТРИКИ	5
КОЭФФИЦИЕНТ КОЛЛИЗИОННОСТИ РАБОЧЕЙ СЦЕНЫ	8
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТРИКИ	8
КОЭФФИЦИЕНТ ТЯЖЕЛЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА	11
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТРИКИ	11
МЕРА ЭНТРОПИИ ОБЪЕКТА	13
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТРИКИ	Ошибка! Закладка не определена.
КОЭФФИЦИЕНТ БРАКА	15
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МЕТРИКИ	15
СРЕДНЕДНЕВНАЯ НОРМА ВРЕМЕНИ ВЫПОЛНЕНИЯ АТОМАРНОЙ ОПЕРАЦИИ	16
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ	16

Бенчмарк для технологии манипуляции

Бенчмарк предназначен для оценки эффективности применения робототехнического комплекса (РТК) в задачах манипуляции предметами по сравнению с использованием ручного человеческого труда.

Бенчмарк содержит следующий набор метрик(коэффициентов):

$\omega_a K_a$ – взвешенный коэффициент автономности,

$\omega_l K_l$ - взвешенный коэффициент времени обучения выполнению задачи,

$\omega_w K_w$ - взвешенный коэффициент грузоподъемности,

$\omega_c K_c$ - взвешенный коэффициент коллизии рабочей сцены,

$\omega_d K_d$ - взвешенный коэффициент тяжелых условий труда,

$\omega_p K_p$ - взвешенный коэффициент брака,

$\omega_o K_o$ - взвешенный коэффициент среднечасовой нормы выполнения атомарной операции,

$\omega_e K_e$ - взвешенный коэффициент энтропии,

Обобщенная формула вычисления бенчмарка:

$$K_{MPE} = \frac{\sum \omega_i K_i}{8}, \quad (1)$$

где $\omega_i K_i$ – взвешенный коэффициент из набора метрик.

Каждая метрика рассматривает характеристику применения робототехнического комплекса по отношению к аналогичной характеристике в случае применения ручного труда и является безразмерной. Значение каждой метрики интерпретируется по отношению к человеку:

- если значение меньше единицы, то применение РТК для измеряемой задачи обладает меньшей эффективностью по сравнению с использованием человеческого труда.
- если больше единицы, то применение РТК более эффективно по отношению к использованию ручного труда.

Таким же образом интерпретируется обобщенная оценка, вычисляемая по формуле (1), причем для значения каждой метрики K_i определяется ее вес ω_i , обозначающий вклад метрики в общий результат.

Вес метрики определяется степенью ее критичности для выполнения отдельных задач и по умолчанию вес коэффициентов одинаков (равен 1).

В случае сравнения РТК с автоматом или другим РТК - значение бенчмарка рассчитывается для них отдельно по отношению к человеку и сравнивается. Более эффективный РТК получит большее значение бенчмарка.

Коэффициент автономности робота

Данная метрика служит для оценки дополнительных затрат на участие человека в работе системы. Значение коэффициента находится в диапазоне $[0 \dots 1]$, где 0 – полученная система не автономна, для обслуживания требуется постоянное присутствие персонала, 1 – полученная система полностью автономна, не требует обслуживающего персонала.

Математическая модель метрики

Для определения коэффициента автономности предлагается использовать вероятность перехода робота в состояние, которое требует взаимодействия с оператором.

Предлагается разделить классы состояний на несколько групп:

- e – Состояния, связанные непосредственно с манипулятором и его ПО
- c – Состояния, связанные оборудованием клиента
- f – Состояния связанные с процессами обеспечения системы материалами для дальнейшей работы, если разрешение этих состояний не связано с использованием дополнительных сотрудников

Для каждого из класса состояний, предлагается ввести вероятность перехода системы в это состояние как отношение количества наблюдений каждого класса событий к общему количеству произведенных операций по формуле:

$$p_i = \frac{n_i}{n_a}$$

Где p_i – вероятность i класса событий (e, c, f), n_i – количество событий i класса, n_a – количество операций, произведенных роботом. Под n_a предлагается использовать количество атомарных операций робота, влияющих на окружающую среду.

Для определения коэффициента автономности предлагается использовать следующую формулу:

$$K_a = (1 - p_e) \cdot (1 - p_c) \cdot (1 - p_f)$$

где, p_e, p_c, p_f – вероятности событий классов (e, c, f).

Для оценки доли времени затрачиваемого на обслуживание робота предлагается ввести следующую метрику:

$$t_s = \sum p_i \cdot n_o \cdot t_i$$

Где p_i – вероятность происхождения i класса событий, n_o – количество атомарных операций робота за смену t_i – нормированное время устранения вывода робота из состояния требующего внешнего вмешательства. Тогда отношение

$$k_{sh} = \frac{t_s}{t_{sh}}$$

Где t_{sh} – время смены, может использоваться расчета количества операторов к количеству роботов

Коэффициент времени обучения новой задаче

Данная метрика показывает, насколько затраты на перенастройку системы больше аналогичных трудозатрат при использовании сотрудников на этой задаче. Величина коэффициента лежит в пределах от $[0, +\infty)$, где значение 0 в случае, если робот не способен обучиться выбранной задаче, значение 1 означает, что переобучение робота занимает время, сравнимое с переобучением человека, значение 2 означает, что эффективнее переобучать робота, чем сотрудников.

Математическая модель метрики

Человек обучается какое-то количество времени. Для сложных задач это могут быть месяцы, для простых задач – часы и минуты. Для расчёта коэффициента времени обучения новой задачи предлагается метрика

$$K_l = \frac{t_{rai}}{t_{hum}}$$

Где t_h – время обучения человека новой задаче, t_{rai} – время обучения интеллектуального агента робота новой задаче.

Параметр t_{rai} – рассчитывается как:

$$t_{rai} = \bigcup (t_{mh})$$

Где t_{mh} – трудоемкость процессов необходимых для обучения интеллектуального агента робота, включающих, но не ограничивающихся:

- Время построения сцены, в которой работает система, включая время интеграции модели захвата, в случае использования специализированного захвата
- Время подготовки планировщика траекторий для работы в сцене
- Время обучения A_i решению задачи

Параметр t_{hum} , состоит из набора обучающих действий для человека.

$$t_{hum} = (t_{int} + \bigcup (t_{hi} \cdot n_{yi})) \cdot n_s$$

Где t_{int} – время плана ввода человека на работу(первичный инструктаж сотрудника), t_{hi} – время i обучающей программы в течении периода, необходимых для обучения человека при получении новой задачи, которые включают в себя, n_{yi} – количество раз в год, n_s – количество обучаемых сотрудников.

Коэффициент грузоподъемности робота к человеку

Данная метрика позволяет оценить отношение эффективности переноса грузов роботом относительно человека с учетом максимальных нормативных ограничений на труд человека. Величина коэффициента находится в диапазоне $(0...+\infty)$, где 0 – робот не способен выполнять задачу, 1 – эффективность робота и человека эквивалентна, 2 – грузоподъемность робота эквивалентна грузоподъемности двух сотрудников.

Математическая модель метрики

Для определения коэффициента грузоподъемности робота к человеку предлагается использовать следующую формулу:

$$K_w = \frac{k_r}{k_h}$$

Где k_r – грузоподъемность робота, k_h – грузоподъемность человека.

Для определения грузоподъемности робота предлагается использовать формулу:

$$k_r = \frac{\sum_0^n m_i}{t}$$

где m_i – перенесенная масса за время t , n – количество перенесенных грузов

Для определения коэффициента грузоподъемности человека необходимо руководствоваться законодательством РФ, в частности [1]. С учетом наличия максимально допустимого веса допустимого для подъема мужчиной предлагается использовать следующую формулу:

$$k_h = \frac{\sum_0^n m_i}{t} \cdot \frac{1}{k_l}$$

Где m_i – перенесенная масса за время t , n – количество перенесенных грузов, k_l – мультипликатор, учитывающий нормативную нагрузку на 1 человека, который рассчитывается как

$$k_l = \max(k_m, k_A)$$

Где k_m – коэффициент, зависящий от максимального веса объекта, переносимого человеком за единицу времени, k_A – коэффициент динамической работы, совершаемой человеком за смену. Для расчета коэффициента k_m предлагается использовать следующую формулу:

$$k_m = \begin{cases} 1, & \forall m_i < m_{norm} \\ \left\lfloor \frac{m_i}{m_{norm}} \right\rfloor + 1, & \exists m_i \geq m_{norm} \end{cases}$$

Где m_{norm} – масса допустимая по нормативам работы, m_i – масса перенесенной единицы груза.

$$k_A = \begin{cases} 1, & A < A_{norm} \\ \left\lfloor \frac{A}{A_{norm}} \right\rfloor + 1, & A \geq A_{norm} \end{cases}$$

$$A = \sum_0^n m_i \cdot l$$

Где m_i – масса перенесенной единицы груза, l – среднее расстояние переноса каждого груза

Таблица 1: Масса поднимаемого и перемещаемого груза вручную, кг

Показатели тяжести трудового процесса	Класс (подкласс) условий труда			
	оптимальный	допустимый	вредный	
	1	2	3.1	3.2
Подъем и перемещение (разовое) тяжести при чередовании с другой работой (до 2 раз в час):				
для мужчин	до 15	до 30	до 35	более 35
для женщин	до 5	до 10	до 12	более 12
Подъем и перемещение тяжести постоянно в течение рабочего дня (смены) (более 2 раз в час):				
для мужчин	до 5	до 15	до 20	более 20
для женщин	до 3	до 7	до 10	более 10
Суммарная масса грузов, перемещаемых в течение каждого часа рабочего дня (смены):				
с рабочей поверхности:				
для мужчин	до 250	до 870	до 1 500	более 1 500
для женщин	до 100	до 350	до 700	более 700
с пола:				
для мужчин	до 100	до 435	до 600	более 600
для женщин	до 50	до 175	до 350	более 350

Таблица 2: Физическая динамическая нагрузка - единицы внешней механической работы за рабочий день (смену), кг*м

Показатели тяжести трудового процесса	Класс (подкласс) условий труда			
	оптимальный	допустимый	вредный	
	1	2	3.1	3.2
При региональной нагрузке перемещаемого работником груза (с преимущественным участием мышц рук и плечевого пояса работника) при перемещении груза на расстояние до 1 м:				
для мужчин	до 2 500	до 5 000	до 7 000	более 7 000
для женщин	до 1 500	до 3 000	до 4 000	более 4 000

Список использованных источников:

[1] <Письмо> Минтруда России от 22.06.2016 N 15-2/ООГ-2247 <О работах, связанных с подъемом и перемещением тяжестей>

Приложение 20 [Методике](#) проведения специальной оценки условий труда, утвержденной [приказом](#) Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 января 2014 г. N 33н

Коэффициент коллизии рабочей сцены

Данная метрика позволяет оценить, каким образом плотность препятствий в рабочей области робота-манипулятора сказывается на времени планирования и выполнения траектории перемещения и на возможности робота вывести рабочий орган в желаемое положение с желаемой ориентацией.

Математическая модель метрики

Для оценки этих характеристик введем в рассмотрение *коэффициент коллизии рабочей сцены*:

$$K_c = K_{cP} / K_{cЧ}, \quad (1)$$

где K_c — коэффициент коллизии рабочей сцены; K_{cP} — коэффициент коллизии рабочей сцены робота; $K_{cЧ}$ — коэффициент коллизии рабочей сцены человека.

Если этот коэффициент меньше 1, то робот уступает человеку; если больше 1, то робот превосходит человека по скорости выполнения операции; если равен 1, то человек и робот справляются с работой одинаково.

Под *коэффициентом коллизии рабочей сцены робота* K_{cP} будем понимать соотношение:

$$K_{cP} = K_{DOI P} / T_{C P P}, \quad (2)$$

где $K_{DOI P}$ — коэффициент достижимости областей интереса робота; $T_{C P P}$ — среднее время выполнения операции роботом.

Под *коэффициентом достижимости областей интереса рабочей зоны робота* $K_{DOI P}$ будем понимать отношение:

$$K_{DOI P} = V_{СПЛ} / V_{OI}, \quad (3)$$

где $V_{СПЛ}$ — объем областей интереса, для которого удалось спланировать траекторию; V_{OI} — общий объем областей интереса.

Область интереса — это область рабочего пространства робота-манипулятора, представляющая собой, например, параллелепипед, в которой робот взаимодействует с объектами внешнего мира в рамках конкретной манипуляционной задачи.

Траектория робота планируется для некоторого положения и ориентации рабочего органа в пространстве. Поскольку даже в бесконечно малом объеме существует бесконечно большое количество комбинаций возможных положений и ориентаций рабочего органа, выполнить оценку объема области интереса, для которого удалось спланировать траекторию перемещения, в непрерывном пространстве представляет достаточно сложную нетривиальную задачу.

Поэтому перейдем от непрерывного пространства к дискретному. Для этого разобьем область интереса на отдельные ячейки. Поставим области интереса в соответствие набор ориентаций рабочего органа. Набор ориентаций рабочего органа робота-манипулятора может содержать в себе, например, ориентации рабочего органа вдоль

вертикальной оси, а также ориентации вдоль осей, отклоненных от вертикальной оси на заданные пользователем углы. Набор ориентаций зависит от специфики манипуляционной задачи. Эти ориентации вместе с координатами центров ячеек используются в качестве целевых положений и ориентаций при решении обратной задачи кинематики.

Пусть область интереса разбита на M ячеек, и области интереса соответствует Q возможных ориентаций рабочего органа. Тогда коэффициентом достижимости областей интереса рабочей зоны (3) для дискретного пространства может быть представлен в виде следующего соотношения:

$$K_{DOI P} = N_{СПЛ} / (M * Q), \quad (4)$$

где $M * Q$ — общее число положений и ориентаций рабочего органа, для которых необходимо спланировать траектории, для данной области интереса; $N_{СПЛ}$ — число положений и ориентаций рабочего органа, для которых получилось спланировать траектории.

Среднее время выполнения операции роботом $T_{СР P}$ вычисляется из соотношения:

$$T_{СР P} = \frac{T_{\Sigma P}}{M * Q}, \quad (5)$$

где T_{Σ} — суммарное время, затраченное на планирование траекторий к центрам ячеек областей интереса со всеми возможными ориентациями рабочего органа, которое вычисляется по формуле:

$$T_{\Sigma P} = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^Q (T_{Пл i j} + T_{ВЫП i j}),$$

где $T_{Пл i j}$ — время планирования траектории к центру i -той ячейки с j -той ориентацией рабочего органа; $T_{ВЫП i j}$ — время выполнения спланированной к центру i -той ячейки с j -той ориентацией рабочего органа траектории.

С учетом (4) и (5) формула (2) для расчета коэффициента коллизии рабочей сцены робота примет вид:

$$K_{с P} = N_{СПЛ} / T_{\Sigma P}. \quad (6)$$

Под коэффициентом коллизии рабочей сцены человека $K_{КЧ}$ будем понимать соотношение:

$$K_{КЧ} = K_{DOI Ч} / T_{СР Ч}, \quad (7)$$

где $K_{DOI Ч}$ — коэффициент достижимости областей интереса человека; $T_{СР Ч}$ — среднее время выполнения операции человеком.

Манипуляционная задача выполняется человеком на специальном оборудовании, например, на конвейерной линии, рабочие места которой специально спроектированы с учетом эргономики. Поэтому коэффициент достижимости областей интереса рабочей зоны будет равен единице, поскольку заведомо известно, что человек имеет возможность манипулировать объектами в пределах области интереса. С учетом этого выражение для расчета коэффициента коллизии рабочей сцены человека (7) примет вид:

$$K_{с Ч} = 1 / T_{СР Ч}. \quad (8)$$

Среднее время выполнения операции человеком $T_{СР Ч}$ может быть известно из технологического процесса или установленных нормативов. Иначе оно находится

эмпирическим путем путем прямого замера времени выполнения серии однотипных операций и деления этого времени на количество операций в серии по формуле:

$$T_{CP\ q} = T_{\Sigma\ q} / m, \quad (9)$$

где $T_{\Sigma\ q}$ — измеренное время выполнения серии однотипных атомарных операций, m — количество атомарных операций в серии.

С учетом (6) и (8) коэффициент коллизии рабочей сцены определяется по формуле:

$$K_c = N_{CPII} * T_{CP\ q} / T_{\Sigma P}.$$

Коэффициент тяжелых условий труда

Коэффициент тяжелых условий труда показывает сравнение эффективности работы робота и человека в рассматриваемых условиях труда и представляет собой отношение фактического времени работы робота к фактическому времени работы человека за смену. Если коэффициент меньше 1 — человек справляется лучше с поставленной задачей; если равен 1 — человек и робот справляются с работой одинаково; если больше 1 — в данных условиях труда робот выполняет операцию лучше.

Математическая модель метрики

Перечень опасных и вредных производственных факторов (ОВПФ) приведен в ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация». Наличие того или иного ОВПФ может накладывать ограничение на продолжительность непрерывной работы в виде обязательных перерывов на отдых, сокращенной длительности смены, а также перерывов на замену средств индивидуальной защиты. Кроме того, ОВПФ накладывают ограничение на количество рабочих часов в неделю и гарантирует работнику увеличенный оплачиваемый отпуск.

Среди производственных факторов, действующих на РТК, можно выделить следующие:

- 1) уровень запыленности и загазованности воздуха рабочей зоны;
- 2) уровень температуры воздуха рабочей зоны;
- 3) уровень вибрации;
- 4) уровень барометрического давления в рабочей зоне и его резкое изменение;
- 5) уровень влажности воздуха;
- 6) уровень ионизации воздуха;
- 7) уровень статического электричества;
- 8) уровень электромагнитных излучений;
- 9) уровень напряженности электрического поля;
- 10) уровень напряженности магнитного поля;
- 11) недостаточная освещенность рабочей зоны;
- 12) повышенная яркость света;
- 13) пониженная контрастность;
- 14) прямая и отраженная блескость;
- 15) повышенная пульсация светового потока;
- 16) повышенный уровень ультрафиолетовой радиации;
- 17) повышенный уровень инфракрасной радиации;
- 18) концентрация химических веществ, приводящих к коррозии металла.

Если уровни факторов условий труда попадают в диапазон условий эксплуатации РТК, то существенные перерывы к непрерывной работе комплекса будут сопряжены с плановым техническим обслуживанием. Если уровни факторов условий труда не попадают в диапазон условий эксплуатации РТК, то применяется или дополнительное оснащение комплекса, например, в виде защитных кожухов, или РТК признается неприменимым в текущей конфигурации для данных условий труда, и принимается решение о замене его составных частей. В случае включения дополнительно оснащения в состав РТК перерывы в непрерывной работе могут быть обусловлены также заменой этого оснащения.

Тяжёлые условия труда сказываются на продолжительности фактической работы в смену. Будем использовать эту величину для оценки тяжести условий труда.

$$K_{\Phi P} = t_{\Phi P} / t_{CM}, \quad (1)$$

где $K_{\Phi P}$ – коэффициент фактической работы; $t_{\Phi P}$ – общее время фактической работы; t_{CM} – продолжительность смены.

Коэффициент тяжести труда будет иметь вид:

$$K_d = K_{\Phi P P} / K_{\Phi P \text{ч}}, \quad (2)$$

где K_d — коэффициент тяжести труда; $K_{\Phi P P}$ — коэффициент фактической работы робота; $K_{\Phi P \text{ч}}$ — коэффициент фактической работы человека.

Коэффициент (мера) энтропии объекта

Данная метрика позволяет оценить сложность решаемой с помощью РТК задачи для системы восприятия робота, которая способна работать с неопределенностью исходного положения объектов манипуляции, а также с изменениями физических характеристик объектов во время манипуляций ими.

Математическая модель метрики

Под *энтропией объекта* будем понимать количество информации, известной об этом объекте. Объект характеризуется положением (x, y, z) , ориентацией (R, P, Y) , массой m , положением центра масс (x_c, y_c, z_c) , габаритами (l, w, h) , формой (s) . Человек свободно манипулирует огромным числом объектов с разными физическими характеристиками, даже если часть из них ему неизвестна. Поэтому для него энтропия любого объекта равна 0. Примем, что энтропия объекта равна 0, если об объекте известно все, и 1, если не известно ничего. Энтропию объекта будем определять по формуле:

$$S = (S_x + S_y + S_z + S_R + S_P + S_Y + S_m + S_{x_c} + S_{y_c} + S_{z_c} + S_l + S_w + S_h + S_s) / 14, \quad (1)$$

где S — энтропия объекта; S_x, S_y, S_z — энтропия положения объекта; S_R, S_P, S_Y — энтропия ориентации объекта; S_m — энтропия массы объекта; $S_{x_c}, S_{y_c}, S_{z_c}$ — энтропия положения центра масс объекта; S_l, S_w, S_h — энтропия габаритов объекта, S_s — энтропия формы объекта.

Оценка энтропии объекта сводится к установлению величины энтропии параметров, используемых в выражении (1). Рассмотрим ряд частных случаев, связанных с этими параметрами.

Энтропия положения и ориентации объекта:

1) Если объект расположен в статическом ложементе, то его положение и ориентация заранее известны. В это случае $S_x = 0, S_y = 0, S_z = 0, S_R = 0, S_P = 0, S_Y = 0$.

2) Если однотипные объекты сложены ровной стопкой, положение и ориентация основания которой строго зафиксировано, то неизвестна только высота, на которой он расположен. В этом случае $S_x = 0, S_y = 0, S_z = 1, S_R = 0, S_P = 0, S_Y = 0$.

3) Если объект расположен в чашеобразном углублении, то известно его положение, но не известна ориентация. В этом случае $S_x = 0, S_y = 0, S_z = 0, S_R = 1, S_P = 1, S_Y = 1$.

4) Если объект расположен на плоской поверхности, высота которой относительно робота известна, то известна только высота, на которой он расположен. В этом случае $S_x = 1, S_y = 1, S_z = 0, S_R = 1, S_P = 1, S_Y = 1$.

5) Если объект расположен на плоской поверхности, высота которой не известна, и робот оснащен аппаратным и программным обеспечением, позволяющим определять положение и ориентацию объекта, то энтропия будет пропорциональна относительной погрешности расчета той или иной координаты δ . В этом случае $S_x = |\delta_x| / 100, S_y = |\delta_y| / 100, S_z = |\delta_z| / 100, S_R = |\delta_R| / 100, S_P = |\delta_P| / 100, S_Y = |\delta_Y| / 100$.

Энтропия массы объекта:

- 1) Если масса объекта заранее не известна, то $S_m = 1$.
- 2) Если масса объектов заранее известна и не изменяется среди однотипных объектов, то $S_m = 0$.
- 3) Если средняя масса m объектов заранее известна, но изменяется от одного однотипного объекта к другому на максимальную величину Δm , то $S_m = |\Delta m| / 2m$.

Энтропия положения центра масс объекта:

- 1) Если объект представляет собой твердое тело и определение положения его центра масс не составляет труда или известно, то $S_{xc} = 0, S_{yc} = 0, S_{zc} = 0$.
- 2) Если объект представляет собой тонкостенную полую трубу, частично заполненную жидкостью, то можно принять допущение, что центр масс этого объекта находится где-то на оси симметрии этого объекта. В этом случае $S_{xc} = 1, S_{yc} = 1, S_{zc} = 0$.
- 3) Если объект представляет собой деформируемое тело, но положение его центра масс не влияет на успешное выполнение манипуляционной задачи, то $S_{xc} = 0, S_{yc} = 0, S_{zc} = 0$.
- 4) Если объект представляет собой деформируемое тело, и положение его центра масс существенно влияет на успешное выполнение манипуляционной задачи, то $S_{xc} = 1, S_{yc} = 1, S_{zc} = 1$.

Энтропия габаритов объекта:

- 1) Если форма объекта остается неизменной, то не изменяются и его габариты. В этом случае $S_l = 0, S_w = 0, S_h = 0$.
- 2) Если объект представляет собой тело, деформируемое вдоль одной оси, например, пружину, то $S_l = 0, S_w = 0, S_h = 1$.
- 3) Если объект является деформируемым, его форма изменяется в процессе выполнения манипуляционной операции, и робот оснащен аппаратным и программным обеспечением, позволяющим определять габариты объекта, то энтропия будет пропорциональна относительной погрешности расчета габаритов вдоль той или иной координаты δ . В этом случае $S_l = |\delta_l| / 100, S_w = |\delta_w| / 100, S_h = |\delta_h| / 100$.

Энтропия формы объекта:

- 1) Если форма объекта остается неизменной, то $S_s = 0$;
- 2) Если форма объекта изменяется, то $S_s = 1$.

Все эти параметры устанавливаются путем визуального осмотра рабочей области, набора объектов манипулирования, измерения их массы, габаритов и изучения технических характеристик составных частей РТК.

Энтропия объекта позволяет оценить сложность решаемой с помощью РТК задачи. Чем меньше энтропия объекта, тем больше информации известно комплексу об объекте и тем выше вероятность успешного выполнения манипуляционной операции. Коэффициент энтропии K_e объекта определяется из соотношения:

$$K_e = 1 - S.$$

Коэффициент брака

Данная метрика позволяет сравнить количественные оценки случаев брака для РТК и неавтоматизированного ручного труда при решении задачи манипуляции. Значения метрики могут находиться в диапазоне от $[0$ до $+\infty)$.

Математическая модель метрики

Брак — это результат работы технологического процесса, не соответствующий нормам и не применимый в дальнейшем совсем или без дополнительных операций на исправление. Для РТК браком можно считать ситуацию или серию неудачно завершённых атомарных операций. Например:

- несколько попыток взятия объекта, приведших к невозможности дальнейшей работы (зацикливание);
- несколько неудачных попыток взятия движущегося объекта, за время которых он выходит из области досягаемости;
- захват с повреждением объекта.

Относительное количество брака вычисляется как:

$$DPU = \frac{N_d}{N_a},$$

где N_d — количество единиц брака, N_a — количество единиц всех операций\продукции.

Тогда итоговая метрика будет выражаться через соотношение количества брака, произведенного РТК, по отношению к человеку вычисляется как:

$$K_p = \frac{DPU_h}{DPU_r},$$

где DPU_h относительное количество брака, произведенного человеком, DPU_r относительное количество брака, произведенного РТК.

Среднедневная норма времени выполнения атомарной операции

Данная метрика определяет среднюю продолжительность выполнения атомарной операции РТК по сравнению с среднедневной нормой человека, выполняющего эти же операции.

Атомарная операция – это логически неделимая часть технологического процесса выполнения более общей задачи. Например: закрутить шуруп, захватить пакет.

Математическая модель

Назовем коэффициентом среднедневной нормы выполнения атомарной операции отношение времени выполнения работы человеком ко времени работы роботизированного комплекса.

$$K_o = \frac{T_h}{T_r},$$

где T_h - среднее время выполнения атомарной операции человеком, T_r - среднее время выполнения атомарной операции,

Среднее время атомарных операций вычисляется как:

$$T_x = \frac{t_w}{N},$$

где t_w – общее время, затраченное на выполнение конкретной операции без учета простоев, связанных с независимыми причинами (например, подача товара), но включающая время на устранение исключительных ситуаций; N – расчётное количество технологических процессов за измеряемое время работы. (расчет производится для человека и робота соответственно)

Таким образом время выполнения атомарной операции складывается из:

$$t_w = \sum t_o + \sum t_f,$$

где $\sum t_o$ суммарное время всех атомарных операций, составляющих технологический процесс, включая подготовительно-завершительные операции; $\sum t_f$ суммарное время всех простоев по внутренним причинам, например, возникновение исключительной ситуации из-за неправильной обработки.