

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.14>

УДК: 519.816

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СИСТЕМЫ МАШИННОГО СИНТЕЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

Михеев М.Ю.¹, Роганов В.Р.¹, Асмолова Е.А.¹, Есимова Н.С.¹, Долговесов Б.С.²,
Кувшинова О.А.³

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет»,
440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11

²Институт автоматизации и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН)

630090, Новосибирская область, г. Новосибирск, пр-кт Академика Коптюга, д.1,

³Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»,
440028, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2023 г.

Аннотация. Исследованы варианты развития программно-технических систем (компьютерных генераторов изображения) машинного синтеза в режиме реального времени (с циклом 80–120 мс) изображений 3D-моделей реперных объектов, наблюдаемых лётчиком во время полёта на авиационном тренажёре через остекление кабины и на приборах имитаторов кабинного оборудования. Рассмотрены отечественные и зарубежные компьютерные генераторы изображения и решаемые ими задачи. Показано, что технологический процесс синтеза 2D-проекций 3D-моделей реперных объектов во всех имитаторах авиационного тренажёра одинаков, несмотря на наблюдение лётчиком 3D-моделей реперных объектов (с возможностью профессиональной тренировки глазомера), или 2D-проекций 3D-моделей реперных объектов с возможностью определения дистанции между моделью летательного аппарата и выбранной 3D-моделей реперных объектов с помощью специальных меток.

Ключевые слова: компьютерный генератор изображения, визуально наблюдаемые 3D-модели, визуально наблюдаемые 2D-проекции 3D-моделей, задачи решаемые на каждом этапе машинного синтеза

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-21-10046, <https://rscf.ru/project/23-21-10046/>.

Автор для переписки: Роганов Владимир Робертович, vladimir_roganov@mail.ru

Введение

В составе бортового оборудования кабины современного летательного аппарата в настоящее время входят приборы, показывающие в заданном интервале электромагнитного излучения район местности, над которым пролетает летательный аппарат [1]. Параллельно существенно увеличилась производительность программно-технических систем, на базе которых разрабатываются разные имитаторы авиационного тренажёра [2]. Это позволяет увеличить число учебных ситуаций, добавив к задачам обучения лётчика профессиональным навыкам пилотирования летательного аппарата в особых условиях полёта ещё решение навигационных задач [3]. Для решения новых задач необходимо кроме традиционного имитатора визуальной обстановки дополнительно разработать имитаторы приборов позволяющих решать навигационные задачи визуально ориентируясь по наблюдаемым 3D-моделям реперных объектов, наблюдаемых лётчиком в разных диапазонах электромагнитного излучения [4]. Анализ показал, что для увеличения числа учебных ситуаций необходимо использовать узкоспециализированные программно-технические системы получившие название «Компьютерные генераторы изображения» назначение которых в режиме реального времени (с циклом 80–120 мс) синтезировать на подключённом к ним экранах 2D-проекции 3D-моделей реперных объектов попавших в камеру наблюдения конкретного имитатора [5]. Назначение наиболее распространённых имитаторов, позволяющих лётчику видеть или 3D-объекты, или 2D-проекции 3D-объектов:

- имитатор визуальной обстановки (эргатическая оптико-программно-техническая система) позволяющая лётчику в зрительном диапазоне электромагнитного излучения (обрабатывает свою базу данных $B_{3D_S(ИВО)}^{(ИВО)}$ с 3D-

моделями реперных объектов, разработанных для имитатора визуальной обстановки (ИВО)) наблюдать через остекление кабины авиационного тренажёра часть $3D$ -модели местности ($3D_s$ размером от 400×400 км до 1500×1500 км) над которой пролетает в t_i момент времени модель летательного аппарата, с возможностью при этом профессионально тренировать его глазомер [6];

– имитатор ночного видения (программно-техническая система с экраном) назначение которого в заданном диапазоне электромагнитного излучения синтезировать изображение наблюдаемое лётчиком на экране имитатора прибора ночного видения, которое является $2D$ -проекцией части $3D$ -модели местности (обрабатывает свою базу данных $B_{3D_s(ИПНВ)}^{(ИПНВ)}$ с $3D$ -моделями реперных объектов, разработанных для имитатора ночного видения) над которой пролетает в t_i момент времени модель летательного аппарата, согласно направлению камеры наблюдения имитатора ночного видения и заданному положению органов управления позволяет лётчику определить расстояние до выбранной $3D$ -модели реперного объекта с помощью специальных меток [7];

– имитатор тепловизора (программно-техническая система с экраном) назначение которого в ИК-диапазоне электромагнитного излучения синтезировать изображение наблюдаемое лётчиком на экране имитатора тепловизора, которое является $2D$ -проекцией части $3D$ -модели местности (обрабатывает свою базу данных $B_{3D_s(ИТ)}^{(ИТ)}$ с $3D$ -моделями реперных объектов, разработанных для имитатора тепловизора) над которой пролетает в t_i момент времени модель летательного, согласно направлению камеры наблюдения имитатора тепловизора и заданному положению органов управления позволяет лётчику определить расстояние до выбранной $3D$ -модели реперного объекта с помощью специальных меток [8]

– имитатор радиолокатора (программно-техническая система с экраном) назначение которого синтезировать наблюдаемое лётчиком на экране имитатора радиолокатора изображение $3D$ -модели местности в отражённых радиоволнах которое является $2D$ -проекцией части $3D$ -модели местности (обрабатывает свою базу данных $B_{3D_{s(IP)}}^{(IP)}$ с $3D$ -моделями реперных объектов, разработанных для имитатора радиолокатора) над которой пролетает в t_i момент времени модель летательного, согласно направлению камеры наблюдения имитатора радиолокатора и заданному положению органов управления позволяет лётчику определить расстояние до выбранной $3D$ -модели реперного объекта с помощью специальных меток [9].

Методы и материалы

Анализ возможных направлений разработки имитаторов, синтезирующих для лётчика изображения $3D$ -модели местности, над которой пролетает модель летательного аппарат показал, что состав их комплектующих вирируется в зависимости от вида изображения местности, которое должен видеть лётчик.

Назначение имитатора визуальной обстановки – создать для лётчика ощущение, что он видит $3D$ -объекты, которые расположены на местности согласно имеющейся у него карты $3D$ -модели местности. Кроме этого, имитатор визуальной обстановки позволяет лётчику во время полёта на авиационном тренажёре оценивать расстояние до выбранных $3D$ -объектов, профессионально тренируя в это время свой глазомер, так же как он это делает во время полёта на реальном летательном аппарате. Критерием качества синтеза $3D$ -объектов имитатором визуальной обстановки является правильное формирование у j -го лётчика отдельной составляющей его когнитивной модели $C_j^{(3D(v))}$ в которой откладывается его умение ориентироваться во внешней среде рассматривая реальную местность или $3D$ -модель местности в зрительном диапазоне электромагнитных волн [10]. Этот критерий постоянно совершенствующейся и

зависит от времени налёта j -го лётчика $T^{(ЛА)}$ на реальном летательном аппарате и от времени обучения лётчика $T^{(АТ)}$ при полётах на авиационном тренажёре, допущенном Заказчиком для обучения лётчика. Так как создать полную модель невозможно [11], имитатор визуальной обстановки создаёт у j -го подготовленного лётчика¹ M_j иллюзию наблюдения им $3D$ -объектов, расположенных на местности. Этот эффект создаётся за счёт целенаправленной активизации у j -го лётчика заданных составляющих его зрительного аппарата (что предполагает включение конкретного j -го лётчика в технологический процесс моделирования для него $3D$ -объектов (в то время как он видит видеоряд из $2D$ -проекцией $3D$ -моделей), а также что имитатор визуальной обстановки моделирует псевдообъёмные изображение). Процесс формирования у j -го лётчика при полётах на авиационном тренажёре отдельной составляющей его когнитивной модели $C_j^{(3D_{ИВО})}$ в которой откладывается его умение ориентироваться в зрительном диапазоне электромагнитного излучения при наблюдении $3D$ -моделей описывается функционалом:

$$C_j^{(3D_{ИВО})}(t_i) \left(O_k \left(S_k, D_k^{(3D_{ИВО})} \right), G_k \left(D_k^{(3D_{G_k})}, A_k, B_{3D_S(ИВО)} \right), C_j^{(3D_{ИВО})}(t_{i-1}) \right), \quad (1)$$

где $O_k \left(S_k, D_k^{(3D_{ИВО})} \right)$ – характеристики k -го $3D$ -индикатора, являющегося составной частью имитатора визуальной обстановки (определяются конструктивными решениями во время разработки имитатора визуальной обстановки), в настоящее время применяют или двухканальный $3D$ -индикатор с диспантными очками или одноканальный безочковый $3D$ -индикатор;

¹ Исследования проведённые авторами статьи показали, что более 99% людей, при наблюдении через $3D$ -индикатор любого типа, сразу видят $3D$ -объект и могут визуально оценивать расстояние до него, однако находятся люди, которым необходим интервал времени для того, чтобы их зрительный аппарат научился видеть $3D$ -объект, а не «неплоское» изображение $3D$ -моделей (такие люди вначале оценивая дистанцию между глазом человека и смоделированным $3D$ -объектом считают, что эта дистанция всегда равна расстоянию до экрана на котором высвечены $2D$ -проекции $3D$ -моделей).

$C_j^{(3D_{(ИВО)})}(t_{i-1})$ – характеристики рассматриваемой составляющей когнитивной модели лётчика, в которой отложены его навыки ориентироваться в зрительном диапазоне электромагнитного излучения при наблюдении 3D-моделей перед очередным тактом режима реального времени;

S_k – это его размер, разрешающая способность, яркость свечения, количество воспроизводимых цветов (при использовании одноканального безочкового 3D-индикатора: S_k – это его размер, разрешающая способность, яркость свечения, количество воспроизводимых цветов каждого экрана (при использовании двух экранов и диспаратных очков позволяющих каждому глазу видеть только свой экран) или S_k – это его размер, разрешающая способность, яркость свечения, количество воспроизводимых цветов одного экрана при использовании диспаратных позволяющих каждому глазу человека поочередно наблюдать изображения синтезированные только для этого глаза (второй глаз в это время закрыт шторой), (при использовании двухканального 3D-индикатора с диспаратными очками);

$D_k^{(3D_{(ИВО)})}$ – описывает телесные углы обзора 3D-модели местности по горизонтали и по вертикали, а также коэффициент падения яркости свечения изображения, высвеченного на экране S_k (определяется техническими характеристиками отдельных оптических элементов, входящих в состав таких 3D-индикаторов: коэффициентом отражения от сферического зеркала и пропускной способностью промежуточных оптических элементов).

$G_k(D_k^{(3D_{G_k})}, A_k, B_k)$ – характеристики синтезированного компьютерным генератором изображения видеоряда из 2D-проекций 3D-моделей, попавших в t_{i-1} момент времени в камеру наблюдения имитатора визуальной обстановки, «вырезающую» из 3D-модели окружающего пространства ту часть, которую в t_i момент времени будет видна (зависят от конструктивных особенностей аппаратной части компьютерного генератора изображения $D_k^{(3D_{(ИВО)})}$, от

особенностей алгоритма A_k проецирования на S_k $2D$ -проекций $3D$ -моделей, и от базы данных $B_{3D_{S(iBO)}}^{(iBO)}$ (от описания с помощью примитивов конструкций и их окраса всех $3D$ -моделей, с учётом места расположения их в $3D$ -модели местности, а также от структуры база данных позволяющей за минимальны интервал времени по соответствующему запросу направить на обработку компьютерным генератором изображения все необходимые примитивы с помощью которых описаны $3D$ -модели реперных объектов, попавшие в t_{i-1} момент времени в камеру наблюдения, от конструкций $3D$ -моделей [12]);

$3D_{G_k}$ – технические характеристики компьютерного генератора изображения: максимальное число визуальных примитивов (варианты их окрашивания и условия наблюдения, как например полупрозрачность или наблюдение в заданных углах) и управляющих примитивов (поменяются для отсекаания на первом этапе части $3D$ -модели местности, которая в данный момент не видна, а также для исключения просвечивания дальней $3D$ -модели через ближнюю), которые он может обработать за заданный цикл режима реального времени (длительность цикла режима реального времени, на серийно выпускаемых авиационных тренажёрах допускается задавать цикл от 80 мс до 120 мс).

$3D$ -объекты наблюдать через имитатор визуальной обстановки может только подготовленный человек. Кроме имитатора визуальной обстановки на новые авиационные тренажёры могут устанавливаться дополнительные имитаторы, синтезирующиеся на экранах S_k таких имитаторов видеоряды из $2D$ -проекций $3D$ -моделей, попавших в камеру наблюдения k -го имитатора.

Остальные имитаторы синтезируют на подключённых к их компьютерным генераторам изображения экранах $2D$ -проекции $3D$ -моделей, попавших их камеры наблюдения. Процесс формирования у j -го лётчика при полётах на авиационном тренажёре отдельных составляющих его когнитивной модели в которых откладываются его умения ориентироваться по наблюдаемым на экранах этих имитаторов изображениям описывается функционалами:

$$C_j^{(3D_{(ИПНВ)})}(t_i) \left(O_k \left(S_k, D_k^{(3D_{(ИПНВ)})} \right), G_k \left(D_k^{(3D_{G_k})}, A_k, B_{3D_S^{(ИПНВ)}}^{(ИПНВ)} \right) \right), \quad (2)$$

$$C_j^{(3D_{(ИТ)})}(t_i) \left(O_k \left(S_k, D_k^{(3D_{(ИТ)})} \right), G_k \left(D_k^{(3D_{G_k})}, A_k, B_{3D_S^{(ИТ)}}^{(ИТ)} \right) \right), \quad (3)$$

$$C_j^{(3D_{(ИР)})}(t_i) \left(O_k \left(S_k, D_k^{(3D_{(ИР)})} \right), G_k \left(D_k^{(3D_{G_k})}, A_k, B_{3D_S^{(ИР)}}^{(ИР)} \right) \right). \quad (4)$$

Таким образом имеется существенное отличие в изображении, синтезируемом имитатором визуальной обстановки и изображениях, синтезируемых остальными имитаторами.

Технологический процесс погружения подготовленного человека в визуально наблюдаемое им через остекление кабины трёхмерное пространство окружающей среды, позволяющей ему совершенствовать составляющие его когнитивной модели (1) и с помощью глазомера определять дистанцию между глазом человека и выбранным 3D-объектом выглядит как последовательность отдельных процессов (рис. 1): получив координаты наблюдателя и направление его взгляда компьютерный генератор изображения выбирает из базы данных $B_{3D_S^{(ИВО)}}^{(ИВО)}$ необходимую информацию и по ней синтезирует на экране входящим в состав 3D-индикатора в каждый такт режима реального времени 2D-проекции 3D-моделей, одновременно при просмотре через оптику 3D-индикатора активизируются заданные составляющие зрительного аппарат подготовленного человека (аккомодация и конвергенция при использовании одноканального безочкового 3D-индикатора или диспаратность при использовании двухканального 3D-индикатора с диспаратными очками) – в итоге подготовленный человек считает, что он видит 3D-объекты. В качестве исходных условий берутся из базы данных $B_{3D_S^{(ИВО)}}^{(ИВО)}$ и координаты места нахождения наблюдателя над 3D-моделью района полётов и направление его взгляда (обычно это направление совпадает с продольной осью модели летательного аппарата), при стандартных размерах телесных углов камеры

наблюдения (обычно это 40 градусов по горизонтали и 30 градусов по вертикали).



Рис. 1. Схема движения информации в имитаторе визуальной обстановки

Технологический процесс синтеза на экранах остальных имитаторов части 3D-моделей окружающей среды в других диапазонах электромагнитного излучения выглядит как последовательность отдельных процессов (Рис. 2–4): получив координаты наблюдателя и характеристики камеры наблюдения (тесные углы обзора и направление оси камеры наблюдения) компьютерный генератор изображения выбирает из подключённой к нему базы данных ($B_{3D_S(ИПНВ)}^{(ИПНВ)}$, $B_{3D_S(ИТ)}^{(ИТ)}$ или $B_{3D_S(ИР)}^{(ИР)}$) необходимую информацию и по ней синтезирует на подключённом к нему экране (он же экран соответствующего имитатора) в каждый такт режима реального времени 2D-проекцию 3D-моделей, попавших в соответствующую камеру наблюдения. В качестве исходных данных берутся данные из базы данных, координаты места нахождения наблюдателя над 3D-моделью района полётов и заданный с приборных панелей соответствующих имитаторов телесные углы камеры наблюдения и направления его взгляда. Отличительной чертой имитаторов кабинного оборудования на экранах которых высвечивается часть 3D-модели окружающего пространства над которой пролетает модель летательного аппарата заключается в отсутствии необходимости использовать особенности восприятия информации зрительным аппаратом человека.



Рис. 2. Схема движения информации в имитаторе прибора ночного видения



Рис. 3. Схема движения информации в имитаторе тепловизора



Рис. 4. Схема движения информации в имитаторе радиолокатора

Анализируя технологические процессы обработки информации в имитаторах, синтезирующих в режиме реального времени изображения 3D-моделей внешней среды наблюдаемые в разных диапазонах электромагнитного излучения, определяем, что общим для всех имитаторов является наличие базы данных, обрабатываемой компьютерными генераторами изображения и выводящие результат синтеза на экран в виде видеорядов из по-разному окрашенных 2D-проекции 3D-моделей.

Исследования показали, что компьютерные генераторы изображения появившиеся во второй половине XX века – это многопроцессорные программно-аппаратные системы, ориентированные на проецирование на плоском экране 2D-проекций 3D-моделей с помощью алгоритмов машинной графики. Отечественные компьютерные генераторы изображения «Аксай», «Альбатрос», «Воробей», «Ариус» по производительности были близки к зарубежным аналогам. Например, производительность «Альбатроса» (совместная разработка ИАиЭ СО АН СССР (г. Новосибирск) и ОАО ПКБМ (г. Пенза)) соответствовала производительности компьютерного генератора изображения MaxVue™ выпускаемого в конце XX века международным лидером в области тренажёроостроения – канадским концерном CAE (г. Монреаль). Существовавшая элементная база предполагала конструкцию такого компьютерного генератора в виде одной стандартной стойки характерной для мини-ЭВМ. Негативные процессы перестройки не позволили нам продолжить развитие отечественных компьютерных генераторов. В настоящее время фирма NVIDIA начала выпуск специализированных видеокарт типа INNO3D GeForce GT 710 Silent LP [N710-1SDV-D3BX] (при этом используются СБИС высокой степени интеграции).

Существовавшие ранее компьютерные генераторы изображения (размещённые в одной стойке) и современные (конструктивно выполненные в виде одной видеокарты) обрабатывают информацию по алгоритмам, доказавшим свою эффективность в течении длительного времени. Учитывая успехи микроэлектроники, а также ограниченное число стандартных команд, выполняемых во время машинного синтеза изображения в дальнейшем, ожидается ещё большая их аппаратная реализация (рис. 5).

Цикл обработки информации во время машинного синтеза изображения условно можно разделить на несколько процессов.

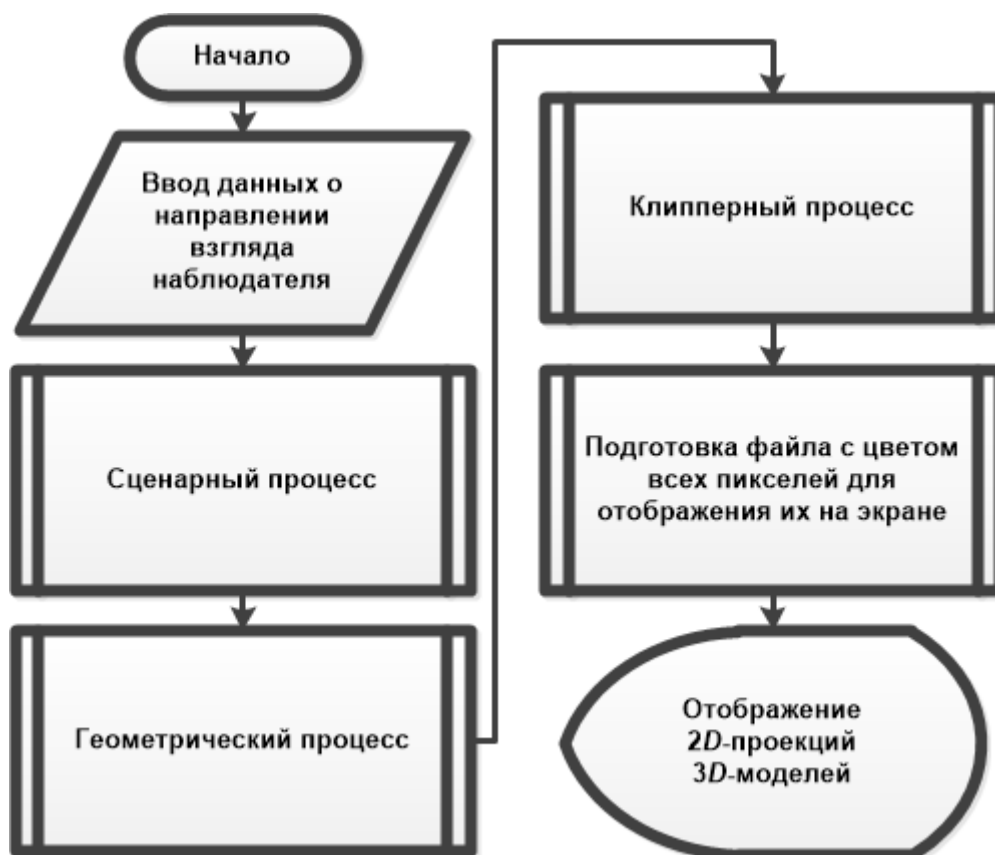


Рис. 5. Движение информации во время цикла режима реального времени внутри многопроцессорной системы «компьютерный генератор изображения»

Первый это сценарный процесс, во время которого исключается часть $3D$ -модели внешней среды с $3D$ -моделями реперных объектов, которые не попали в камеру наблюдения, или которых не затронул след камеры наблюдения. На этом этапе решается задача с окрашиванием визуально наблюдаемых примитивов и решается задача исключения просвечивания дальних $3D$ -моделей реперных объектов через ближних $3D$ -моделей реперных объектов.

Во время выполнения второго «геометрического процесса» на экранную плоскость проецируются окрашенные $2D$ -проекции $3D$ -моделей реперных объектов.

Во время выполнения третьего «клипперного процесса» обрезаются лишние участки $2D$ -проекции $3D$ -моделей реперных объектов, которые выходят за след камеры наблюдения.

На четвёртом этапе формируются цвета и яркость всех пикселей экрана с последующей передачей этой информации непосредственно на пиксели экрана.

Как минимум второй и третий процессы предполагают параллельную обработку информации по достаточно простым алгоритмам машинной графики. Анализ известных решений показал, что в дальнейшем в связи с увеличением разрешающей способности экрана и его физического размера, на котором в каждый цикл режима реального времени высвечиваются окрашенные $2D$ -проекции $3D$ -моделей реперных объектов начиная со второго этапа предполагается аппаратная реализация всех необходимых алгоритмов с целью потоковой обработки необходимой информации. Уже сейчас такой подход позволил увеличить производительность компьютерных генераторов изображения с 16000 визуальных примитивов (производительность «Альбатроса» и «MaxWue™») до 2500000 примитивов – производительность современных компьютерных генераторов изображения с видеокартами фирмы NVIDIA.

Анализ также показал, что компьютерные генераторы изображения являются неотъемлемой частью любого имитатора, синтезирующего для лётчика изображение части окружающей среды в любом диапазоне световых волн ($3D_{(ИВО)}$, $3D_{(ИПНВ)}$, $3D_{(ИТ)}$, $3D_{(ИР)}$). При этом для разработчиков тренажёров, как правило недоступно изменение алгоритмов обработки информации начиная со второго этапа. Таким образом качество получаемого итогового изображения в виде $2D$ -проекций $3D$ -моделей реперных объектов будет зависеть от разработки конструкций $3D$ -моделей реперных объектов и их размещения в $3D$ -модели внешней среды с учётом:

- алгоритма отсечения на этапе сценарного процесса части $3D$ -модели внешней среды, которая не попала в данный момент времени в камеру наблюдения;
- алгоритма окрашивания визуальных примитивов;
- алгоритма исключения ошибочного эффекта просвечивания дальних $3D$ -модели реперных объектов через ближних $3D$ -модели реперных объектов.

Предполагается и разработка алгоритмов сценарного процесса, если известные ранее решения не устраивают разработчиков рассматриваемых имитаторов.

Заключение

Анализ имитаторов, синтезирующих для лётчика изображения 3D-модели внешней среды в которой перемещается подвижная модель летательного аппарата показал:

– в настоящее время авиационный тренажёр может оснащаться имитаторами позволяющими лётчику наблюдать 3D-модель местности в разных диапазонах световых волн, что предполагает: разработку $3D_{(ИВО)}$ – отдельной 3D-модели местности для имитатора визуальной обстановки; $3D_{(ИПНВ)}$ – отдельной 3D-модели местности для имитатора прибора ночного видения; $3D_{(ИТ)}$ – отдельной 3D-модели местности для имитатора тепловизора; $3D_{(ИР)}$ – отдельной 3D-модели местности для имитатора радиолокатора;

– в состав каждого имитатора входит компьютерный генератор изображения, синтезирующий на экране в режиме реального времени видеоряд из 2D-проекций 3D-моделей реперных объектов;

– современные компьютерные генераторы изображения позволяют разработчикам управлять только первым процессом машинного синтеза (сценарным процессом) и от качества решения на этом этапе задач (связанных также с качеством конструкций 3D-моделей реперных объектов и вариантов окрашивания визуальных примитивов входящих в эти конструкции) будет зависеть итоговое изображение части 3D-модели местности попавшей в камеру наблюдения соответствующего имитатора.

Так как разработчики компьютерных генераторов изображения увеличивают степень аппаратной реализации алгоритмов машинного синтеза начиная со второго этапа, в дальнейшем большинство исследований

посвящённых вопросам синтеза изображения 3D-модели внешней среды удовлетворяющих требованиям Заказчика будет сосредоточено на:

– алгоритмах отсечения на этапе сценарного процесса части 3D-модели внешней среды, которая не попала в данный момент времени в камеру наблюдения;

– алгоритмах окрашивания визуальных примитивов;

– алгоритмах исключения ошибочного эффекта просвечивания дальних 3D-модели реперных объектов через ближних 3D-модели реперных объектов.

Финансирование: Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-21-10046, <https://rscf.ru/project/23-21-10046>

Литература

1. Шукшунов В. Е. Автоматизированные обучающие системы профессиональной подготовки эксплуатантов воздушных судов. // Москва. Машиностроение. –240 с.
2. Kozlov S., Elykov N., Belago I. Visualization of rain effects for driving simulators. // GraphiCon 2006-International Conference on Computer Graphics and Vision. – 2006. – С. 363-366.
3. ГОСТ 21659-76. Авиационные симуляторы. Понятия и определения. Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 30 марта 1976 г. № 716 срок действия установлен с 01.07.1977 г. Издательство Стандарты. Москва. «Московский принтер», 1976. – 10 с.
4. Роганов В.Р., Михеев М.Ю. Управление ресурсами специализированной системы синтеза изображения района полетов для авиационного тренажера. // Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 3. с. 48-60.
5. Vyatkin S. I., Dolgovesov B. S. A method for visualizing multivolume data and functionally defined surfaces using GPUS. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – Т. 57. – С. 141-148.
6. Roganov V., Chetvergova M., Remontova L. Features of the Formation of an “Information Flight Model” by Simulators of an Aviation Simulator. // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2022. – Т. 2224. – №. 1. – С. 012099.

7. Роганов В.Р., Есимова Н.С., Кувшинова О.А., Аль-Амиди М.А.Д. Особенности окрашивания 3D-моделей, синтезируемых в режиме реального времени методами машинной графики. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 2 (62). – С. 68-72.
8. Roganov V. R. et al. The task of increasing the number of training situations as one of the areas for improving the ergatic software and hardware systems “Aviation simulator”. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1061. – №. 1. – С. 012014.
9. Роганов В.Р. Моделирование внешней среды для авиационного тренажёра// Монография. Москва, Изд. Ай-Петри. 2022. –125 с.
10. Rolfe J. M., Hampson B. P. Flight simulation–viability versus liability issues of accuracy, data and validation. // The Aeronautical Journal. – 2003. – Т. 107. – №. 1076. – С. 631-635.
11. Венников В. Теория подобия и моделирование. // М.: Машиностроение. 1976. 479 с.
12. Роганов В.Р., Четвергова М.В., Кувшинова О.А., Шамсулдин Х.А.Х. Структура баз данных компьютерных генераторов изображения синтезирующих 3D-модель района полётов авиационного тренажёра. // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2023. Т. 12. № 2 (62). – С. 41-47.

Для цитирования:

Михеев М.Ю., Роганов В.Р., Асмолова Е.А., Есимова Н.С., Долговесов Б.С., Кувшинова О.А. Программно-аппаратные системы машинного синтеза изображений для авиационных тренажеров // Журнал радиоэлектроники. – 2023. – №. 11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.11.14>