

Оптическая система захвата движения для анализа и визуализации трехмерных процессов*

В.А. Князь

knyaz@gosniias.ru

ФГУП Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия

Качество решения технических задач зависит от вида, достоверности и степени полноты данных, используемых для анализа исследуемых процессов. Важным классом задач является анализ и визуализация сложных, быстротекущих перемещений и деформаций объектов и их частей, требующий специальных средств регистрации движения. В работе представлены результаты разработки и применения оптической системы захвата движения, построенной на фотограмметрических методах обработки изображений, обеспечивающих высокую точность измерений. Приведен обзор современных систем захвата движения, представлено техническое описание разработанной системы, основных алгоритмов, обеспечивающих решение комплекса задач захвата трехмерного движения. Обсуждаются результаты применения для решения различных классов задач, связанных с обработкой, анализом и визуализацией трехмерного движения.

Ключевые слова: захват движения, обработка изображений, 3D анализ данных, 3D визуализация, калибровка, автоматизация.

Optical Motion Capture System for 3D Process Analysis and Visualization *

V.A. Knyaz

State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russia

Paper presents the review of motion capture systems based on different physical principles and the results of development, evaluation and application for analysis and visualization of vision-based 3D motion capture system. The description of the hardware and original software of developed system is given along with its general technical characteristics. The results of the system application for various tasks solution such as estimation of slow motion, robot dynamical model identification, UAV navigation accuracy estimation are presented.

Keywords: motion capture, image processing, 3D data analysis, 3D visualization, calibration, automation.

Введение

Качество решения технических задач зависит от вида, достоверности и степени полноты данных, используемых для анализа исследуемых процессов. Важным классом задач является анализ и визуализация сложных, быстротекущих перемещений и деформаций объектов и их частей, требующий специальных средств регистрации движения. В работе представлены результаты разработки и применения оптической системы захвата движения, построенной на фотограмметрических методах обработки изображений, обеспечивающих высокую точность измерений.

Приведен обзор современных систем захвата движения, представлено техническое описание разработанной системы, основных алгоритмов, обеспечивающих решение комплекса задач захвата трехмерного движения. Обсуждаются результаты применения для решения различных классов задач, связанных с обработкой, анализом и визуализацией трехмерного движения.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента для Ведущих научных Школ России (НШ-3477.2014.8) и поддержке РФФИ, грант 5-08-99580. Работа опубликована при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-07-20347.

Типы систем захвата движения. В настоящее время для захвата движения применяется несколько типов систем, построенных на различных физических принципах. Среди них - механические, акустические, магнитные и оптические системы.

Механические системы используют потенциометры, расположенные в заданных точках на теле актера и обеспечивающие регистрацию пространственных положений. К преимуществам таких систем можно отнести интерфейс, аналогичный системе покадровой съёмки, широко используемой в киноиндустрии; независимость от магнитных полей или отражений и быструю настройку. С другой стороны, их существенным недостатком являются ограничения, накладываемые проводами, соединяющих датчики с системой регистрации и ограниченность применения для сложных или быстротекущих процессов.

В акустической системе набор акустических приемников принимает звуки из звуковых передатчиков, расположенных на объекте (актере). Сигналы от излучателей принимаются приемниками, а дальность до передатчика рассчитывается по промежутку времени между переданным и принятым сигналом. Для определения положения в простран-

стве каждого передатчика выполняется триангуляция рассчитанных расстояний между излучателем и каждым из приемников.

Акустические системы захвата движения имеют ряд недостатков, таких как: ограничение на свободу перемещений, обусловленной проводами, прикрепленными к актеру, ограниченное число передатчиков, которые могут быть использованы, и восприимчивость к отраженным сигналам или внешнему шуму.

Будучи относительно недорогими, магнитные системы обладают достаточно высокой точностью и быстродействием (около 100 кадров в секунду) для захвата относительно несложного движения объекта. Они используют набор магнитов в качестве маркеров заданных точек и набор приемников для измерения положения и ориентации маркеров по отношению к антенне [1]. К недостаткам магнитных систем можно отнести ограничения, вызванные кабелями и возможной интерференцией в магнитном поле, вызванной различными металлическими конструкциями.

Типичные оптические системы захвата движения используют методы обработки изображений для обнаружения заданных точек объекта. Как правило, они включают набор видеокамер для записи последовательностей изображений актера/объекта, на котором размещены специальные метки. Затем видеопоследовательности обрабатываются для обнаружения заданных точек, идентификации и прослеживания движения. Точность расчёта 3D-координат точек определяется процедурой калибровки системы и зависит от задач приложения. Эти системы являются наиболее дорогими на рынке вследствие применения передовых технологий, а именно: камер высокого разрешения и высокой частоты съемки и сложного запатентованного программного обеспечения. Стоимость таких систем достигает сотен тысяч долларов.

Несомненными преимуществами оптических систем является возможность захвата движения на очень высокой скорости, отсутствие ограничений для актера при передвижении и большой потенциал для автоматизации процесса обработки.

Области применения. Первоначальный импульс созданию систем захвата движения был дан индустрией развлечений, в которой появилась необходимость точного захвата быстрых движений актёра. И по сей день киноиндустрия и индустрия видеоигр являются основными потребителями данных от систем захвата движения. Сфера применения систем захвата движения расширяется очень динамично. К основным областям применения относятся медицина, спорт, различные отрасли промышленности, научные исследования [2].

Системы захвата движения в медицинских целях используются для точного анализа движений человека, которые не могут быть зарегистрированы с помощью других средств. Подробное изучение движения человека, его численный анализ и визуализация позволяют понять существо проблем и предложить способы их устранения.

На высокоточные системы захвата движения существует большой спрос в спорте высоких достижений, вследствие того, что получаемая с их помощью информация о движениях спортсмена во время соревнований регистрируется с очень высокой скоростью. Это информация является основой для улучшения спортивной техники и достижения более высоких результатов.

Захват движения часто является единственным инструментом в научных исследованиях конкретных задач, где информация о 3D-движении объекта не может быть получена с помощью других средств. Типичными примерами являются анализ очень быстрого динамического процесса, анализ вибраций, расчет и анализ 3D траектории объекта и другие.

Система захвата движения

Целью разработки являлось создание недорогой системы захвата движения, обеспечивающей высокую скорость регистрации данных и высокую точность расчета трехмерных координат заданных точек, позволяющих решать задачи реконструкции трехмерного движения, в первую очередь, технических систем для анализа их технических характеристик.

Разработанная система захвата 3D-движения, получившая название "Mosca" (Motion capture scalable system), основана на фотограмметрических методах 3D-измерений и обеспечивает возможность работы при различных размерах рабочей области и высокий уровень автоматизации обработки захваченных данных. В зависимости от области применения система может быть легко модифицирована для рабочих пространств от 100 мм до 10 м.

Структура и технические характеристики.

Разработанная система захвата движения (рис. 1) использует от 2 до 4 камер технического зрения для получения видеопоследовательностей движения объекта. Все камеры работают в синхронном режиме со скоростью кадров до 100 кадров в секунду под управлением персонального компьютера (ПК), обеспечивая возможность точного расчета 3D-координаты заданных точек. Система может быть расширена за счет дополнительных камер при включении дополнительного персонального компьютера в систему.



Рис. 1: Система захвата движения Mosca

Для обеспечения высокой точности 3D измерений на предварительном этапе работы системы выполняется процедура калибровки и внешнего ориентирования по заданному тестовому полю, обеспечивающая точность измерений на уровне 0.01% размера рабочего пространства. Процедура калибровки автоматизирована за счет применения оригинальных кодированных меток (Князь, 1998) для детектирования, идентификации и измерения координат опорных точек тестового поля на изображениях. Основные технические характеристики системы приведены в таблице 1.

Таблица 1: Технические характеристики системы.

Разрешение камеры	656 × 491 пикс
Скорость захвата	до 100 кадр/сек
Кол-во отслеживаемых точек	до 200
Рабочее пространство	Настраиваемое: от 0.1 × 0.1 × 0.1 м до 10 × 10 × 10 м
Точность координат 3D-точек	0.0% РП

Возможность изменения масштаба изображения обеспечивается быстрой и высокоавтоматизированной процедурой калибровки и внешнего ориентирования.

Программно-алгоритмическое обеспечение. Система захвата движения Mosca работает под управлением оригинального программного обеспечения, реализующего законченный цикл получения и первичной обработки данных, а именно:

- калибровка и внешнее ориентирование системы в автоматизированном режиме;
- синхронный захват видеопоследовательностей с 4 камер системы;
- детектирование и отслеживание меток на видеопоследовательности;
- расчет трехмерных траекторий заданных точек;
- построение скелетной модели объекта;
- визуализация захваченного трехмерного движения объекта.

Программный интерфейс системы с обнаруженными и идентифицированными метками и 3D-моделью скелета, построенной с использованием захваченных данных показан на рис. 2.



Рис. 2: Интерфейс программного обеспечения

Для системы захвата движения, основанной на обработке изображений, надежность и удобство для пользователя являются ключевыми факторами, определяющие качество системы. Поэтому при разработке существенное внимание было уделено возможности автоматизации процессов детектирования, идентификации, отслеживания меток, определяющих движение объекта. Ряд оригинальных алгоритмов [2] обнаружения меток и сопоставления одинаковых меток на снимках с разных камер системы, отслеживания и разрешения коллизий меток в 2D и 3D пространстве был разработан и реализован в программном обеспечении системы.

Приложения

Разработанная фотограмметрическая система захвата движения использовалась для решения ряда задач, требующих точных и снятых с высокой частотой данных о движении объекта. Среди них биометрические и биомеханические приложения, оценка равномерности движения динамического стенда на малых скоростях, идентификация динамической модели четырехколесного робота, расчёт точности

оценки собственного положения беспилотных летательных аппаратов, контроль виртуальных объектов и другие.

Оценка равномерности движения стенда. Важным инструментом полунатурного моделирования являются многостепенные динамические стенды (рис. 3), позволяющие имитировать динамику движения летательного аппарата в замкнутом контуре управления. Одним из режимов функционирования стенда является работа на малых угловых скоростях (порядка Для оценки качества выполнения данного режима требуется определить точность и равномерность выдерживания заданной угловой скорости.



Рис. 3: Динамический многостепенный стенд

Традиционные средства измерений угловой скорости, использующиеся сегодня при аттестации динамических стендов, позволяют проводить измерения с темпом порядка 10 Гц, что недостаточно для надежной оценки равномерности угловой скорости на малых скоростях.

Вместе с тем, применение оптической системы захвата движения обеспечивает решение данной задачи с требуемой точностью и временным разрешением. На рис. 4 приведены результаты обработки траекторий 12 меток, расположенных на вращающемся кольце стенда.

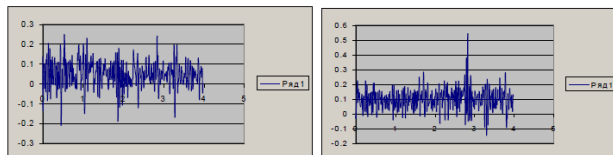


Рис. 4: Графики изменения угловой скорости стенда от времени ($\omega_{зад} = 0.05(^{\circ}/) - 0.1(^{\circ}/).$)

Идентификация динамической модели четырёхколёсного робота. Задачи идентификации

систем требует знания реакции системы на заданное входное воздействие. В случае колесного робота необходимо зарегистрировать выходные параметры (скорость v_x и угловое положение θ) робота, синхронно с входными командами управления. Для получения необходимой информации могут быть использованы акселерометры, но недостаточная точность измерений и необходимость синхронизации требуют применения дополнительного оборудования.

Применение системы захвата движения позволяет эффективно решить данную задачу, при включении в программное обеспечение специальный программный блок синхронизации входных команд робота и захвата кадров.

Для регистрации движений робота Hercules (рис. 5) в ходе эксперимента на его верхней панели был расположен набор круглых меток, используемых для расчёта выходных параметров v_x и θ .

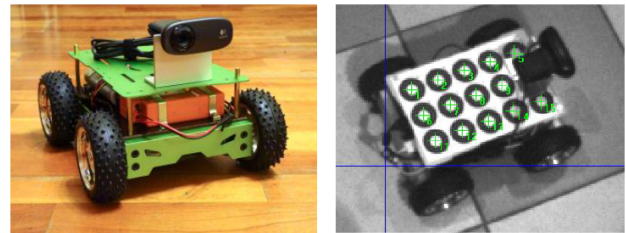


Рис. 5: Четырёхколёсный робот Hercules.

Чтобы оценить полную динамику модели робота Hercules, генерировалась последовательность команд в форме белого шума. Последовательность входных команд, продольная скорость v_x и скорость вращения θ , полученные с помощью системы захвата, показаны на рис. 6.

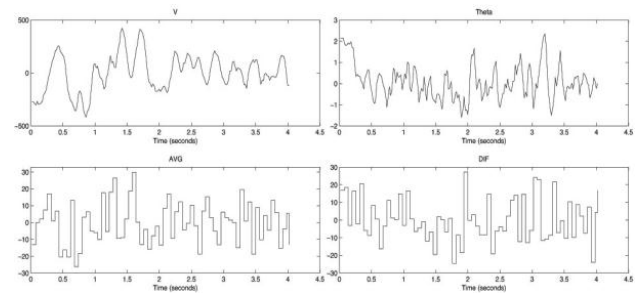


Рис. 6: Выходные значения v_x , и входные команды (белый шум).

Эти данные позволили идентифицировать модель системы и обеспечить требуемое качество управления роботом.

Оценка точности БЛА. Для оценки качества работы алгоритмов по определению собственного положения системы машинного зрения необходимо

сравнение результатов собственной оценки с данными независимых измерений. В случае беспилотного летательного аппарата (БЛА) наиболее рациональным решением является использование оптической системы захвата движения.

Исследования проводились с использованием БЛА Parrot AR.Drone2.0, имеющим в составе оборудования две видеокамеры: фронтальную и вертикальную. Изображения, поступающие с фронтальной камеры, использовались в полете для оценки собственного положения БЛА.

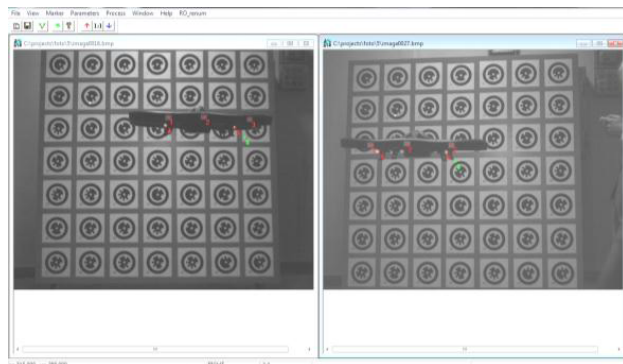


Рис. 7: Изображения БЛА, полученные системой захвата.

Одновременно полет БЛА с нанесенными на него метками расчета трехмерной траектории регистрировался системой Mosca (рис. 7). Оба набора данных (собственная оценка положения и внешние траекторные измерения) были зарегистрированы в общей системе координат, определяемой калибровочным полем. Средние ошибки в положении и угловой ориентации БЛА приведены в таблице 2.

Таблица 2: Средние ошибки БЛА.

α	ω	\varkappa
0.0232	-0.08392	0.03281
X, mm	Y, mm	Z, mm
-5.2618	8.0955	27.2022596

Выводы

Разработана оптическая система захвата движения Mosca, обеспечивающая высокую точность измерений и высокий уровень автоматизации процессов обработки данных на основе оригинальных алгоритмов для обнаружения, идентификации и отслеживания точек объекта.

Результаты применения системы Mosca в различных областях применения, таких как биомеханика, идентификация динамической модели, оценка точности ориентирования беспилотных летательных аппаратов подтверждают высокую точность и высокую надежность разработанной фотограмметрической системы для захвата 3D-движения.

Литература

- [1] *Yabukami S., Kikuchi H., Yamaguchi M., Arai K.I., Takahashi K., Itagaki A., Wako N.* Motion capture system of magnetic markers using three-axial magnetic field sensor. // *Magnetics*, 2000. – Vol.36, №.5, – pp.3646–3648.
- [2] *Moeslund T.B., Hilton A., Kruger V.* A survey of advances in vision-based human motion capture and analysis. // *Computer Vision and Image Understanding*, 2006. – Vol.104, pp.90–126.
- [3] *Князь В.А.* Scalable photogrammetric motion capture system “Mosca”: development and application // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5/W6*, 43-49, doi:10.5194/isprsarchives-XL-5-W6-43-2015, 2015.