Пьезоэлектрические миниатюрные стабилизированные оптико-электронные системы с высоким разрешением

Nir Karasikov*[a], Gal Peled [a], Roman Yasinov [a], Rita Yetkariov [a]

[a] Nanomotion Inc.,1 Comac Loop, Suite 14B2, Ronkonkoma, NY 11779

Переведено на русский язык ООО "Промышленная метрология" 10 января 2018, С-Петербург, Комендантский проспект 30 к.1, тел. +7 (812) 438-17-18, 438-17-21, 348-39-62, 348-39-63, info@metrology-spb.ru

АННОТАЦИЯ

Пьезодвигатели характеризуются высокой плотностью механической мощности, быстрым откликом и прямым приводом. Эти функции полезны для миниатюрных подвесных оптико-электронных систем (ОЭС) на карданном подвесе. На основе таких двигателей была разработана подвесная ОЭС. Диаметр 58 мм, вес 190 грамм. В подвесной ОЭС установлены две камеры: Flir Quark и дневная камера высокого разрешения. Динамическая производительность достигает 3 Рад/с и ускорение 100 Рад/сек^2. Был разработан алгоритм стабилизации двух осей, обеспечивающий стабилизацию на уровне 80 мкРад. Кроме того, был разработан панорамный сбор изображения со скоростью шесть стабилизированных полей обзора в секунду. В публикации рассматривается конструкция карданного подвеса и открытая архитектура, позволяющая адаптировать ОЭС к другим камерам (SWIR и т. д.), алгоритм управления и экспериментальные результаты по стабилизации и получению панорамных изображений на вибрационной платформе и на БПЛА.

Ключевые слова: оптико-электронная система на карданном подвесе, ультразвуковые двигатели

1. ВВЕДЕНИЕ

Компактные ультразвуковые двигатели были впервые предложены в 1970-х годах и впоследствии разработаны в ответ на спрос на точные немагнитные позиционеры в полупроводниковой промышленности [1,2]. Основным принципом их работы является преобразование электрической энергии в механический момент с помощью соединения статора, вибрирующего на ультразвуковых частотах, с подвижной осью (как правило, линейной или поворотной сборкой. Стандартная конструкция ультразвукового двигателя использует связь между механическим резонансом вибрирующего пьезокерамического статора и электрическим резонансом цепи возбуждения переменного тока, которая позволяет получить относительно высокую амплитуду вибрации при использовании низких напряжений питания. Этот подход позволяет уменьшить большие усилители напряжения, по существу, до размера батареи. В отличие от электромагнитного двигателя эффективность пьезоэлектрического двигателя не зависит от размера, что обеспечивает хороший потенциал для применения миниатюрных пьезоэлектрических двигателей в малогабаритных механических и оптических системах. Их преимуществами являются высокая плотность и эффективность энергии, большой момент при низких скоростях и малая мощность, немагнитные свойства [3], бесшумный прямой привод без редуктора, быстрый отклик и малое время установления, жесткий тормоз, отсутствие люфта и отсутствие потребления энергии при удержании положения [4].

Среди различных возможных конструкций линейный двигатель стоячей волны, основанный на сочетании первичных про дольных и вторичных изгибных режимов (двигатель L1B2), хорошо подходит для промышленного производства, сочетая в себе прочную конструкцию с высоким динамичным диапазоном скорости и высокой точностью позиционирования [5,6,7,8,9]. Существующие решения эволюционировали от отдельного двигателя до полного решения для движения прямолинейных или поворотных осей движения [10], состоящих из двигателя, подвижной сборки, схемы обратной связи с замкнутым контуром, драйвера и программируемого контроллера движения [11]. Уникальные особенности миниатюрных двигателей L1B2 имеют особые преимущества для существующего тренда на применение в малогабаритных карданных подвесах БПЛА.

Малые беспилотные летательные аппараты набирают популярность во многих областях, таких как оборонное применение [12], службы оперативного реагирования [13], картография [14], сельское хозяйство [15] и т. д., где их основное применение заключается в сборе изображений/видео. Сопутствующий прогресс в области датчиков изображения с высоким разрешением [16] позволяет снимать изображения с высоким разрешением, однако на практике изображения, полученные от БПЛА, теряют в четкости [17] из-за вибрации летных двигателей, ветра, атмосферной турбулентности и внезапных входных сигналов оператора. В результате предпринимаются постоянные усилия по разработке эффективных методов стабилизации изображения, которые будут совместимы с требованиями по малому весу и низкой стоимости для применения в коммерческих БПЛА.

В данной публикации рассказывается о разработке эффективного решения, которое сочетает в себе преимущества ультразвуковых двигателей L1B2 в двухосном карданном подвесе. Результатом является новая карданная система, управляемая двигателями L1B2 с использованием их преимуществ, а также определенный новый алгоритм управления, чтобы добиться быстрого динамического отклика и точного позиционирования (преодоления возмущений визирной линии), а также уменьшенный вес и низкое энергопотребление. В Разделе 2 приводятся данные о конструкции и характеристиках подвеса, в Разделе 3 приводится информация о разработанном алгоритме управления, а в Разделе 4 подробно представлены результаты испытаний.

*nir.karasikov@nanomotion.com; phone 1 800 821-6266; fax 1 631 585-1947; www.nanomotion.com

Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications XIII, edited by Daniel J. Henry, Gregory J. Gosian, Davis A. Lange, Dale Linne von Berg, Thomas J. Walls, Darrell L. Young, Proceedings of SPIE Vol. 9828,

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

2. КОНСТРУКЦИЯ И ОСОБЕННОСТИ КАРДАННОЙ ОЭС

Карданная система (Рис. 1) содержит две камеры: ИК-камеру и дневную камеру. Движение обеспечивается двумя поворотными осями, ось наклона управляется двумя, а панорамная ось приводится в движение четырьмя пьезодвигателями Nanomotion Edge (Рис. 1(d) и Рис. 2), управляемыми в замкнутом серво-контуре драйвером/ контроллером Nanomotion XCD2. Стабилизация осуществляется за счет использования нового алгоритма управления ультразвуковыми двигателями L1B2 (см. Следующий раздел) с использованием сигнала от гироскопа. Обработка изображений выполняется через карту обработки видео сигнала Ambarella (A12A75). Параметры карданной системы представлены в Таблице 1. Характеристики двигателя Nanomotion Edge приведены в Таблице 2.

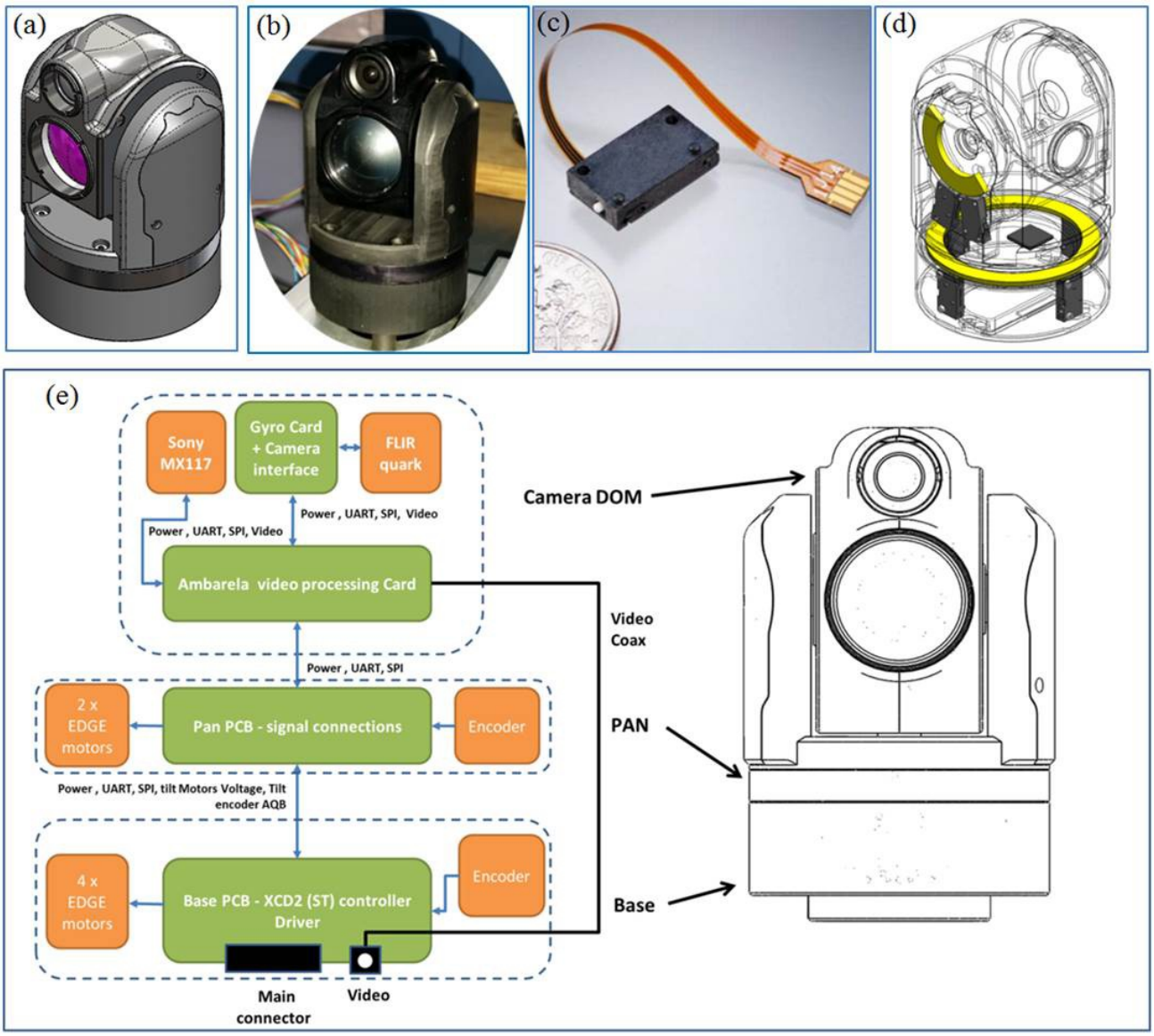

Рисунок 1: Конструкция карданной ОЭС: a) Внешний вид (рисунок); б) Фотография карданного подвеса; c) Изображение двигателя Nanomotion Edge; d) Чертеж, показывающий конструктивные блоки механизма привода поворотных осей - два двигателя EDGE, предварительно нагруженные на ведущее керамическое кольцо оси наклона, и четыре двигателя EDGE, предварительно нагруженные на ведущее керамическое кольцо панорамной оси, e) Блок-схема карданной ОЭС.

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

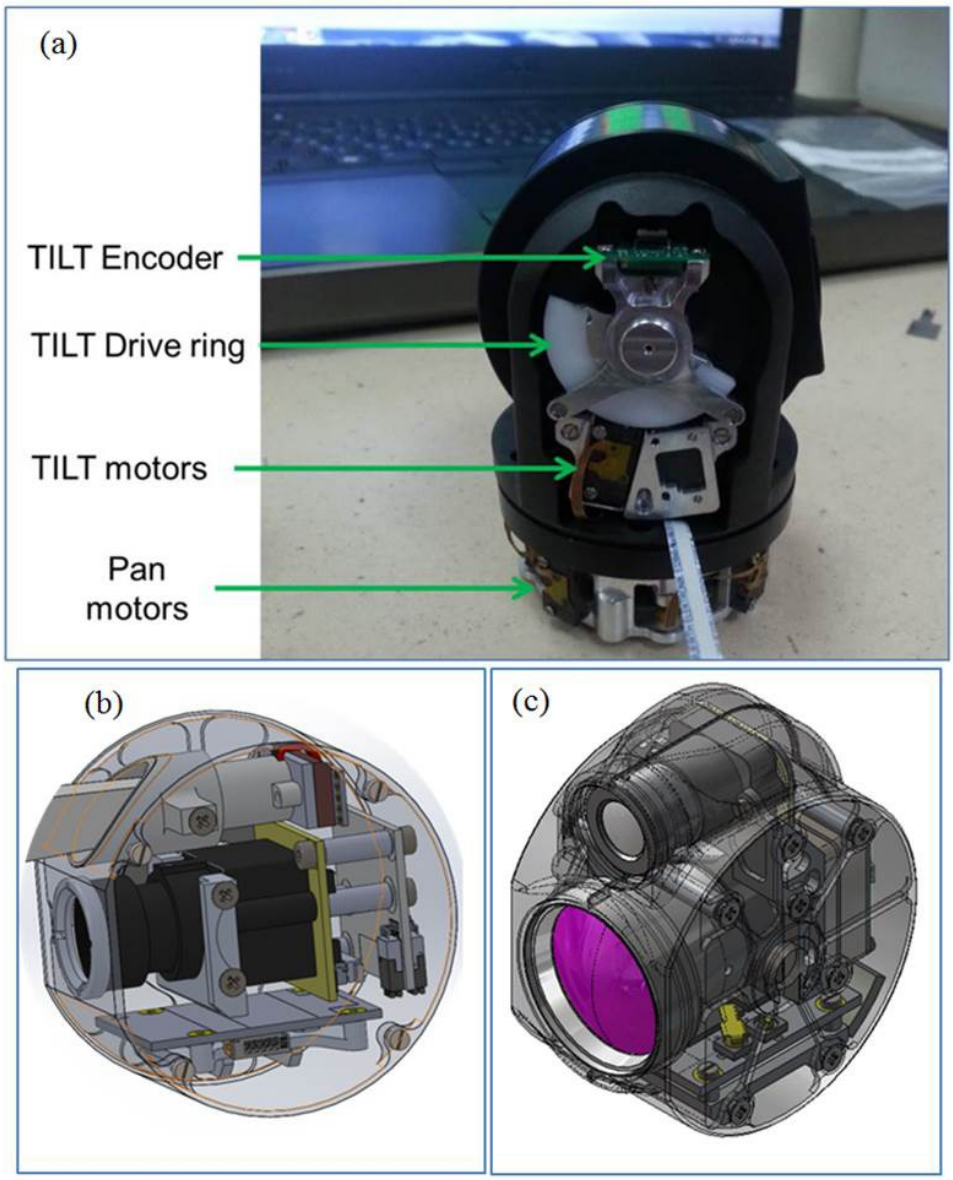

Рисунок 2: Конструктивные блоки карданной ОЭС: a) Изображение собранной карданной ОЭС, показывающее расположение двигателей панорамного поворота и наклона, приводного кольца и энкодера наклона; открытая архитектура позволяет устанавливать различные камеры на карданный подвес, например на (b) изображена комбинация высокочувствительной ПЗС-камеры для работы при низком уровне освещенности и лазерной подсветки ближней ИК-области (NIR), а на (c) показана комбинация длинноволновой ИК-камеры (LWIR) и дневных CMOS-камер. Другие варианты включают камеры коротковолновой области ИК-спектра (SWIR-камеры) и лазерный целеуказатель.

Стабилизация изображения выполняется за счет того, что двигатели постоянно корректируют угол каждой оси вращения, чтобы сохранить положение оптического механизма с ПЗС, заблокированном на желаемом исходном изображении. Основные шаги схематично показаны на Рисунке 3. Правильная ориентация определяется с помощью обратной связи по скорости от гироскопа, для определения абсолютной ориентации относительно инерциальной системы координат (Земли) и обратной связи по положению от инкрементного энкодера высокого разрешения, соединенного с каждой осью вращения, для определения абсолютной ориентации относительно платформы, на которой установлен карданный шарнир.

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

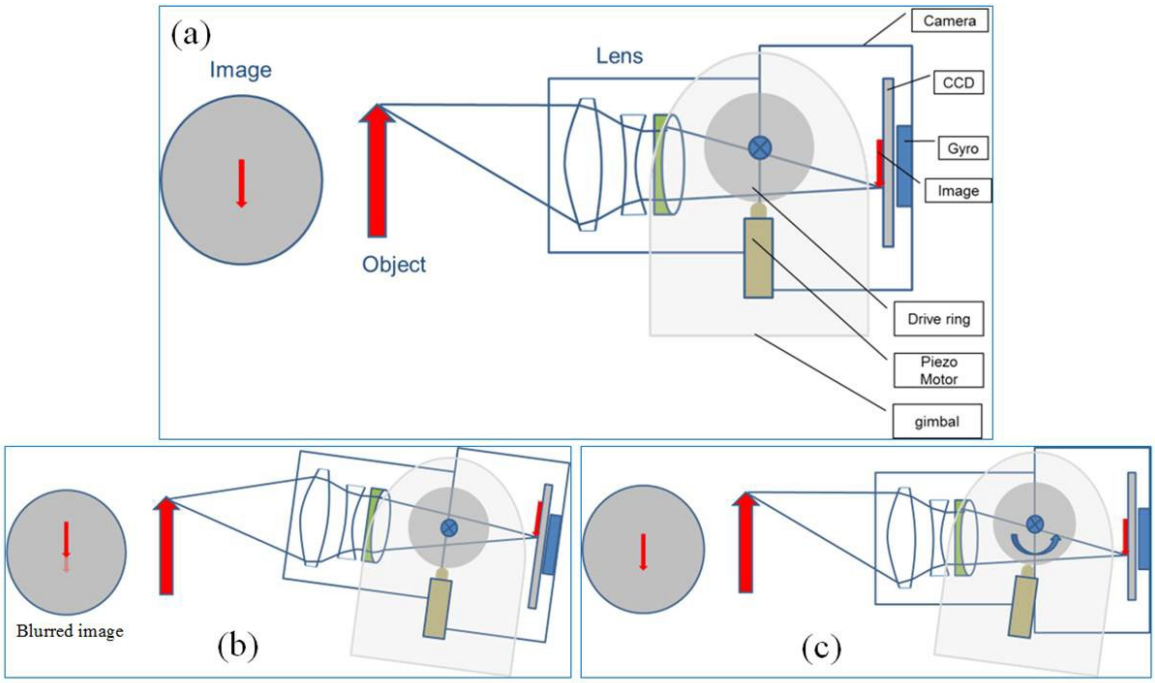

Рисунок 3: Схематическое изображение основных блоков механизма стабилизации изображения: а) Начальное состояние с двигателем, предварительно нагруженным на осевое приводное кольцо и оптикой, сфокусированной на исходном изображении; б) Внезапное внешнее возмущение поворачивает кардан относительно изображения; с) Контур управления запускает двигатель для поворота соответствующей оси, чтобы уменьшить возмущение. В действительности, чтобы изображение стабилизировалось, коррекция выполняется непрерывно.

Таблица 1: Параметры карданной системы

Параметры	**Значение**	**Примечания**
Стабилизация и наведение	Механ. стабилиз. 2-х осей от гироскопа	-
Разрешение обратной связи / Повторяемость	23 мкРад / 70 мкРад	В соответств. с инкрементным датчиком
Диапазон угла Панорамы / Наклона	Наклон: +110° до -30° ; Панорама: ± 174°	Опционально 360xN
Требуемая угловая скорость поворота на угол Панорамы / Наклона	3 Рад/с (180°/с)	Достигаемая скорость двигателя превышает это значение
Макс. угловое ускорение Панорамы / Наклона	100 Рад/с^2	-
Датчики карданной ОЭС	3-осевой гироскоп и акселерометр, датчик, температура	-
Типы камер	• LWIR (7-14 мкм) ИК-камера 640x480, zoom x4, f=35 мм, F/1.5	FLIR QUARK640

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

Параметры	Значение	Примечания
	• Дневная камера 12Mpx Zoom x 6, f=12 мм, F/1.6	SONY IMX117
Диаметр, высота, вес	58 мм, 85 мм, 190 г	-
Рабочее напряжение	7,6 В постоянного тока (7,5-28 В)	-
Потребляемая мощность	Стандартно 5,5 – 6,5 Вт, Макс. 10 Вт	-

Таблица 2: Характеристики пьезодвигателя EDGE Nanomotion

Параметры		Примечания
Макс. мощность двигателя	0.35 Н	Сила при нулевой скорости
Макс. линейная скорость	200 мм/с	Скорость в нулевой силе
Максимальная потребляемая мощность	0.75 Вт	-
Макс. напряжение двигателя	11 Вольт AC	-
Жесткость в направлении движения	0.075 Н/мкм	Справочное значение

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

3. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

На указанном ниже алгоритме петли управления сервоприводом учитываются три различных источника углового возмущения для каждой оси вращения. Каждый источник является результатом действия различных возмущающих сил. Первый источник является результатом действия внутренней демпфирующей силы, возникающей из-за углового движения оси. Он моделируется как пропорциональный скорости оси (b(t)). Второй источник связан с силами трения, препятствующими движению подшипника и поворотного кольца, которые моделируются как постоянная сила, действующая в направлении, противоположном направлению скорости. Третьей силой является крутящий момент, вызванный линейным ускорением карданной системы, что важно в случае, если ее центр масс не сбалансирован с центром вращения. Эта сила моделируется как пропорциональная ускорению (a(t)) и массе кардана (m). Схематическое изображение серво-контура показано на Рисунке 4. Серво цикл выполняется на (высокой) частоте более 8 кГц. Двигатели приводятся в действие с использованием линейного режима Nanomotion, при котором сила/скорости двигателя [19] линейно зависимы от команды контроллера.

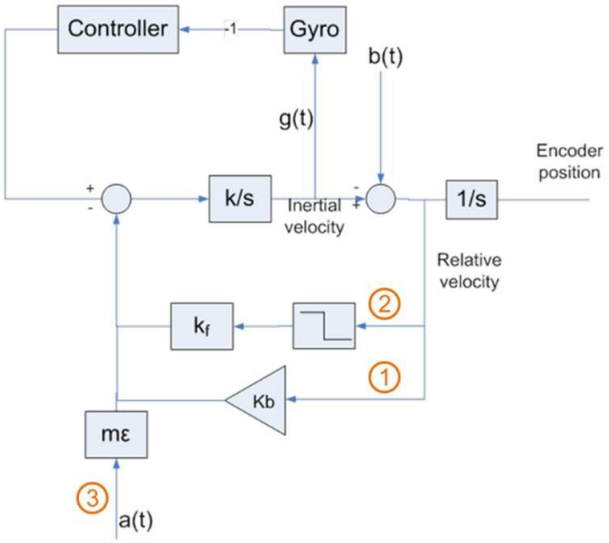

Рисунок 4: Схематическое представление контура сервопривода для одной оси вращения. В петле учитываются три возможных источника возмущений: внутренняя сила демпфирования базового углового движения (обозначена 1), сила трения, возникающая из-за движений двигателя, подшипника и кольца скольжения (обозначена 2) и крутящий момент, возникающий во время ускорений из-за несбалансированного центра масс (обозначен 3).

4. ХАРАКТЕРИСТИКИ

Зависимость силы от скорости на каждой оси была проверена на полной команде управления двигателями. Полученные результаты ускорения и скорости были записаны как функции в зависимости от времени. Результаты показаны на Рисунке 5. Фактическая производительность выше ожидаемой, которая была оценена для более консервативных минимальных значений.

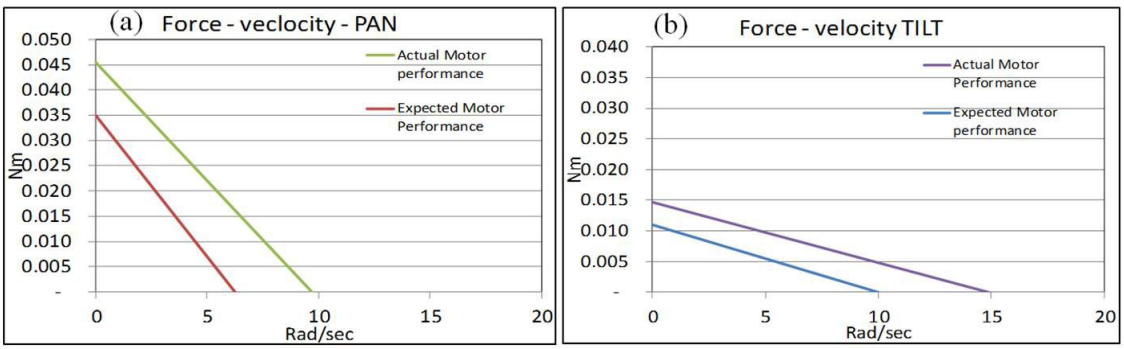

Рисунок 5: Зависимость крутящего момента от скорости для панорамной оси (a) и оси наклона (b).

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

Производительность карданной системы была оценена путем записи откликов системы с открытым и замкнутым контуром, а также изображений и видеоизображений, а также ввода сигналов помех в систему.
Для проверки частотной характеристики разомкнутого контура системы был записан нормализованный отклик гироскопа на синусоидальный командный сигнал низкого уровня, поданный на двигатели. Результирующая величина и фаза срабатывания показаны на графике Боде на Рисунке 6. Жесткая конструкция обеспечивает хорошую частотную характеристику, что проявляется отсутствием резонансов вплоть до самой высокой тестируемой частоты на уровне 1 кГц.

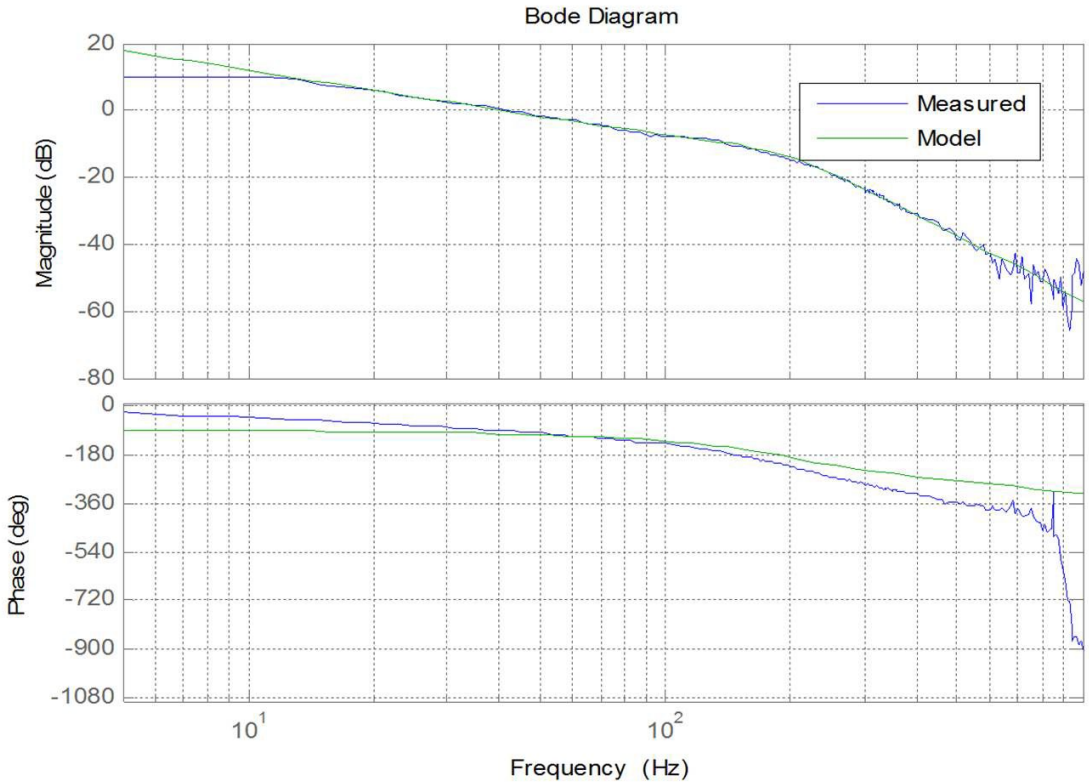

Рисунок 6: График Боде, показывающий нормализованный отклик разомкнутого контура гироскопа на команду низкого уровня, подаваемую на двигатели оси панорамирования. Моделируемый отклик (в зависимости от характеристик двигателя и системы) сопоставим с измеренным (измеряется на собранном кардане).

Для испытаний с замкнутым контуром карданная система была установлена на вращающейся базовой платформе, вносящей помехи с заранее определенной частотой и амплитудой. Положение и скорость кардана были записаны. Пример показан на Рисунке 7, где уровень синусоидального возмущения указан в виде скорости базовой платформы (как функция от времени). Показана инерционная скорость панорамной оси карданной системы. Первоначальное тестирование указывает на возможность достижения ср. кв. уровня стабилизации 80 мкРад. Работа по улучшению алгоритма управления продолжается.

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

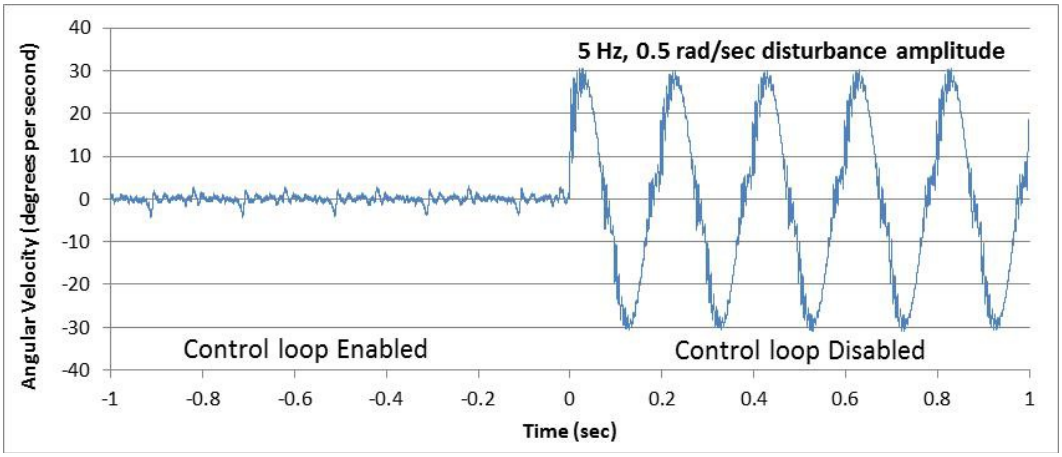

Рисунок 7: График, показывающий угловую скорость панорамной оси карданного шарнира, с включением и без включения контура стабилизации управления. ОЭС расположена на поворотной сборке, которая вводит помехи, проявляемые при отключении контура управления.

Наглядный пример стабилизации изображения показан на Рисунке 8. На тестовой платформе вводилось гармоническое вращательное возмущающее движение с частотой 9 Гц и амплитудой колебаний 1°. На Рисунке 8 (a) показано изображение ИК камеры, выполненное без включения стабилизации замкнутого контура, где проявляется сильное размытие. На Рисунке 8 (b) показана та же область, при которой включена стабилизация, где размытие не заметно. На Видео 1 показывается видеосигнал с ИК камеры при включенном и выключенном контуре стабилизации.

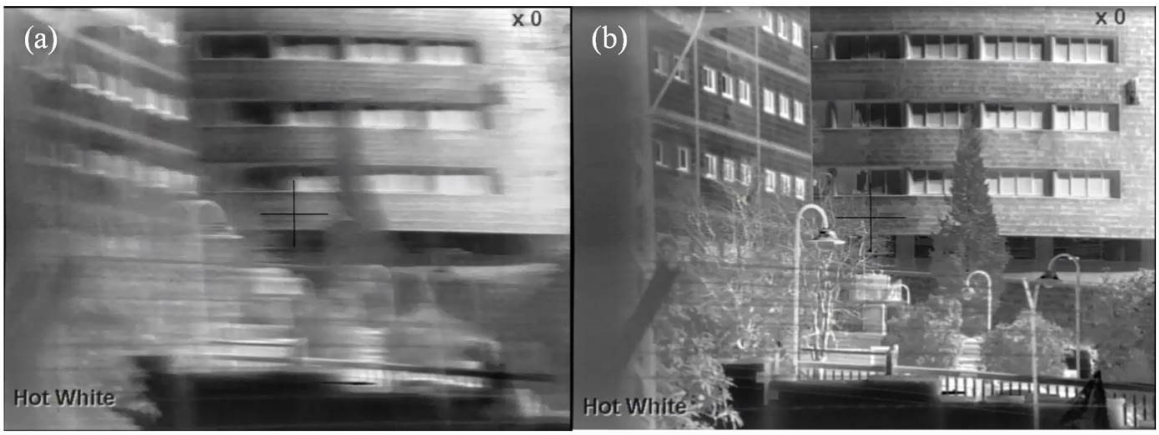

Рисунок 8: Стабилизация изображения по одной оси (панорамной) при наличии гармонических колебаний. Изображения были сделаны с использованием ИК камеры. Амплитуда вибрации ± 1 °, а частота - 9 Гц. ОЭС размещается на платформе, синусоидально вращающейся вокруг панорамной оси с частотой 9 Гц. Изображения берутся без (а) и с (б) включенной петлей стабилизации сервопривода.

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

Видео 1: Стабилизация изображения по одной оси (панорамной) при наличии гармонических колебаний. Изображения были сделаны с использованием ИК камеры. ОЭС размещается на платформе, синусоидально вращающейся вокруг панорамной оси. Амплитуда вибрации ± 1 °, а частота - 9 Гц. Возмущение активно в течение всего времени видео. В первой части стабилизация сервопривода не активна и активируется во второй части.

Возможности быстрого перемещения и удержания карданной системы можно использовать не только для подавления помех, но также для увеличения размера и качества изображения путем интеграции нескольких изображений, сделанных за короткий промежуток времени. Одной из таких возможностей является создание панорамного изображения путем сшивания нескольких изображений, сделанных в тандеме. Пример показан на видео 2, показывающем создание панорамных изображений с частотой 1 Гц, причем каждое изображение собрано из 6 вспомогательных изображений, с использованием координаты положения кадра без дополнительной обработки изображений. Очевидна высокая точность.

Видео 2: Панорамный вид с частотой обновления 1 Гц. Каждое изображение построено из шести меньших изображений, собранных с помощью быстрых пошаговых перемещений и установок. Изображения были сделаны с использованием дневной камеры. ОЭС была установлена в качестве полезной нагрузки на БПЛА. Изображения были сделаны во время полета. http://dx.doi.org/10.1117/12.2225623.2

5. РЕЗЮМЕ

В этой публикации описывается конструкция и испытания двухосного карданного подвеса на основе ультразвуковых пьезоэлектрических двигателей L1B2. Применение двигателей L1B2 с сопутствующими преимуществами прямого привода, высокой жесткостью и высокой точностью позиционирования позволяет добиться стабилизации изображения в широком диапазоне частот, используя легкий вес и компактную карданную систему. Был разработан специальный алгоритм управления, который учитывает возмущающие силы внешнего ускорения, внутреннего демпфирования и трения, с получением обратной связи от комбинации гироскопа и двух датчиков положения. Тесты стабилизации показали, что этот карданный вал может достичь уровня стабилизации 80 мкРад. Достигнутые высокие динамические характеристики способствовали панорамному сканированию в шесть кадров в секунду. Такая система может предложить важные преимущества для малоразмерных БПЛА для оборонной отрасли, служб оперативного реагирования, картографии, сельского хозяйства и т. д. Система может быть оборудована различными типами камер в соответствии с требованиями каждой области применения.

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

ПЕРЕЧЕНЬ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Uchino, K., "Piezoelectric ultrasonic motor: overview", Smart Materials and Structures 7(3), 273-285 (1998).

[2] Sashida, T., and Kenjo, T., [An Introduction to Ultrasonic Motors], Clarendon Press, Oxford, (1993).

[3] Fisher, G. S., Axel, K., Iordachita, I., Csoma, C., Whitcomb, L. L. and Fichtinger, G., "MRI Compatability of Robot Actuation Techniques - A comparative Study," Proc. MICCAI 2008, Part II, LNCS 5242, Berlin, Springer-Verlag, 509-517, (2008).

[4] Wiwattananon, P., and Bryant, R. G, "Performance Comparisons and Down Selection of Small Motors for Two-Blade Heliogyro Solar Sail 6U CubeSat," NASA/TM–2015-218784, Langley Research Center, Hampton, Virginia, (2015).

[5] Zumeris, J., "Ceramic Motor," United States Patent 5453653, Sept. 1995.

[6] Ganor, Z., "High Resolution Piezoelectric motor," United States Patent 7061158 B2, June 2006.

[7] Heverly, M., Dougherty, S., Toon, G., Soto, A. and Blavier, J.-F., "A low mass translation mechanism for planetary FTIP spectrometry using an ultrasonic piezo linear motor," Proc. of the 37th Aerospace Mechanisms Symposium, Johnson Space Center, May 15-17, (2004).

[8] Tsai, M.-S., Lee, C.-H. and Hwang, S.-H., "Dynamic Modeling and Analysis of a Bimodal Ultrasonic Motor," Ieee Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 50(3), 245-256 (2003).

[9] Aoyagi, M., and Tomikawa, Y., "Ultrasonic Motor Based on Coupled Longitudinal-Bending Vibrations of a Diagonally Symmetric Piezoelectric Ceramic Plate," Electronics and Communications in Japan 79(6), 60-67 (1996).

[10] Ganor, Z., Shiv, L., Karasikov, N. and Avital, A., "Piezoelectric motors and motor driving configurations," United States Patent 6979936 B1, Dec. 2005.

[11] Nanomotion Ltd., "Motion systems," Nanomotion, March 2016, http://www.nanomotion.com/product-type/motion-systems/ (March 2016).

[12] Austin, R., [Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment], John Wiley&Sons, (2011).

[13] Terwilliger, B., Vincenzi, D., Ison, D., Witcher, K. and Thirtyacre, D., "Influencing Factors for Use of Unmanned Aerial Systems in Support of Aviation Accident and Emergency Response," Journal of Automation and Control Engineering 3(3), 246-252 (2015).

[14] Siebert, S., and Teizer, J., "Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system," Automation in Construction 41, 1-14 (2014).

[15] Zhang, C., and Kovacs, J. M., "The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review," Precision Agriculture 13(6), 693-712 (2012).

[16] Vogelsong, T., Tower, J., Senko, T., Levine, P., Janesick, J., Zhu, J., Zhang, D., van der Wal, G. and Piacentino, M., "Low-light NV-CMOS image sensors for day/night imaging," Proc. SPIE 8713 (2013).

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx

[17] Sieberth, T., Wackrow, R. and Chandler, J., "UAV Image Blur - Its Influence and Ways to Correct it," International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-1/W4 33 – 39 (2015).

[18] Liu, S., Zhao, H., Wang, L. and Mai, Y., "Electronic image stabilization algorithms based on flight characteristics of the small UAV," Proc. SPIE 8713 (2013).

[19] Nanomotion Ltd., "AB5 and AB51 Drivers User Manual, chapter 5," Nanomotion, March 2016, http://www.nanomotion.com/wp-content/uploads/2015/05/AB05458200-02-User-Manual.pdf (March 2016).

Контактные данные:

ООО "Промышленная метрология"
http://metrology-spb.ru/
тел. +7 (812) 438-17-18 (доб. 115)
факс +7 (812) 438-17-21
моб: +7 (950) 023-73-89
e-mail: karev_p@metrology-spb.ru

Downloaded From: http://proceedings.spiedigitallibrary.org/ on 05/19/2016 Terms of Use: http://spiedigitallibrary.org/ss/TermsOfUse.aspx