

УДК 621.396.988.6

А. В. Збруцкий, Ю. А. Малышева, В. В. Бурнашев**ТОЧНОСТЬ КОМПЛЕКСИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ С ОПТИЧЕСКИМ ДАТЧИКОМ ГОРИЗОНТА****Введение**

Качество решения многих прикладных задач, выполняемых беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) [1], зависит, в значительной степени, от точности определения параметров движения. Поэтому актуальной является задача разработки навигационной системы, которая бы с одной стороны отвечала массогабаритным и стоимостным ограничениям БПЛА, а с другой – имела бы достаточную точность.

В настоящее время самыми распространенными навигационными технологиями для БПЛА являются бесплатформенные инерциальные и спутниковые навигационные системы (БИНС и СНС), которые могут использоваться как отдельно, так и в сочетании друг с другом [2].

Широкое применение во многих сферах получили интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы. Часто для уменьшения стоимости таких систем их инерциальная часть строится на недорогих микроэлектромеханических сенсорах (МЭМС) [3], что значительно снижает точность определения навигационных параметров. При этом инерциальная часть интегрированной навигационной системы является единственным источником определения углов ориентации объекта.

Комплексирование системы угловой ориентации возможно путем введения в систему дополнительных измерителей, отличающихся по принципу работы от сенсоров основной системы [4], [5]. Такими сенсорами могут быть оптические датчики и системы визуальной информации.

Многие современные БПЛА имеют на своем борту видеокамеру, которая используется для решения разнообразных задач. Вполне естественно попытаться использовать информацию, предоставляемую видеоизображением, для определения параметров движения. Такую задачу можно решить с помощью технологии компьютерного зрения.

В работах [6] – [9] используются различные методы компьютерного зрения для выявления линии горизонта на изображении с целью частичного определения углового положения малоразмерного беспилотного летательного аппарата. В работе [10] описаны некоторые практические результаты при определенных погодных условиях.

Постановка задачі

Рассмотрим задачу повышения точности определения углов тангажа и крена комплексированной системы ориентации и навигации путём введения в ее состав оптического датчика горизонта.

Оптический датчик горизонта

Пусть на борту БПЛА установлена направленная вперед RGB камера с прямой линейной перспективой формирования изображения (рис. 1, *a*). Если некоторая точка $P(X, Y, Z)$ трехмерного пространства попадает в поле зрения бортовой камеры, то она проецируется на плоскость изображения в точку $p(x, y)$ по закону:

$$P(X, Y, Z) = \frac{f}{Z} p(x, y), \quad (1)$$

где f - фокусное расстояние линзы камеры, Z - глубина, x, y - координаты точки p на изображении.

Линия горизонта является хорошим ориентиром для определения параметров движения летательного аппарата (ЛА), который в большинстве случаев находится в поле зрения камеры большую часть времени. Смещение и угол наклона линии горизонта на полученном изображении содержит информацию об углах крена γ и тангажа ϑ ЛА относительно поверхности Земли (рис. 1, *б*).

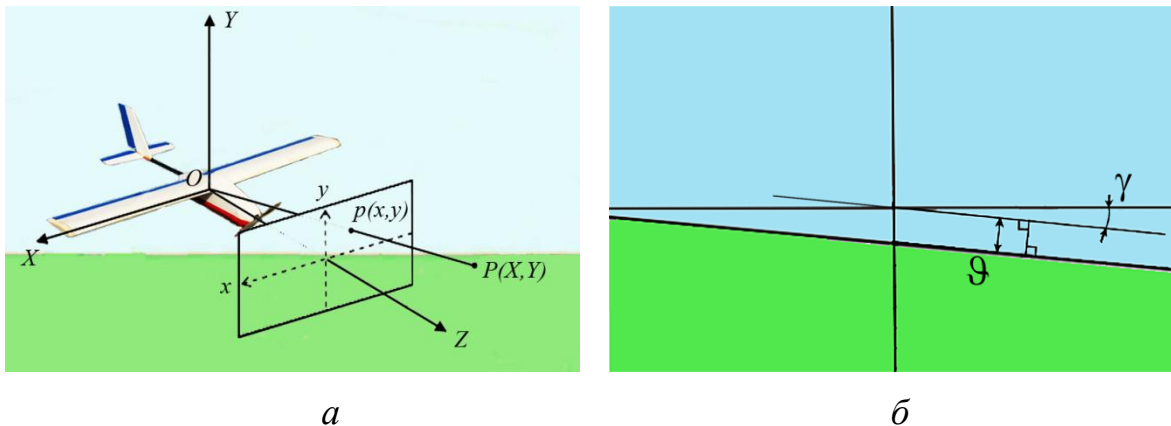


Рис. 1. Формирование линии горизонта на плоскости изображения бортовой видеокамеры

Рассмотрим исходное RGB изображение, полученное бортовой камерой (рис. 2, *a*). Его анализ показывает, что линию горизонта можно выделить на всех трех цветовых каналах (рис. 2, *б*). Поэтому для получения максимального количества информации о положении линии горизонта процесс обработки будем применять параллельно к трем каналам исходно-

Розділ 1. Інформаційні системи

го изображения, после чего проведем объединение полученной информации.

Первым шагом обработки является процедура определения границ с помощью фильтрации изображения заранее определенной последовательностью морфологических операторов, которые хорошо сохраняют размеры и положения различных границ. После этого следует применение оператора Собеля [11]. Вид всех трёх цветных каналов после первых двух шагов обработки показан на рис. 2, в.

Исследование модели дисторсии линзы бортовой камеры показывает, что наибольшее искривление испытывают пиксели, которые находятся в углах изображения. Для того чтобы уменьшить влияние этого эффекта во время объединения информации трёх каналов, накладывается бинарная круговая маска (рис. 2, з). В качестве центра круговой маски выбран оптический центр линзы, спроектированный на плоскость изображения.

Следующим шагом обработки является построение линии горизонта с помощью линейного преобразования Хафа [11]. Результат работы этого алгоритма представлен на рис. 2, д. Из рис. 2, д видно, что алгоритм имеет достаточную высокую точность в определении линии горизонта.

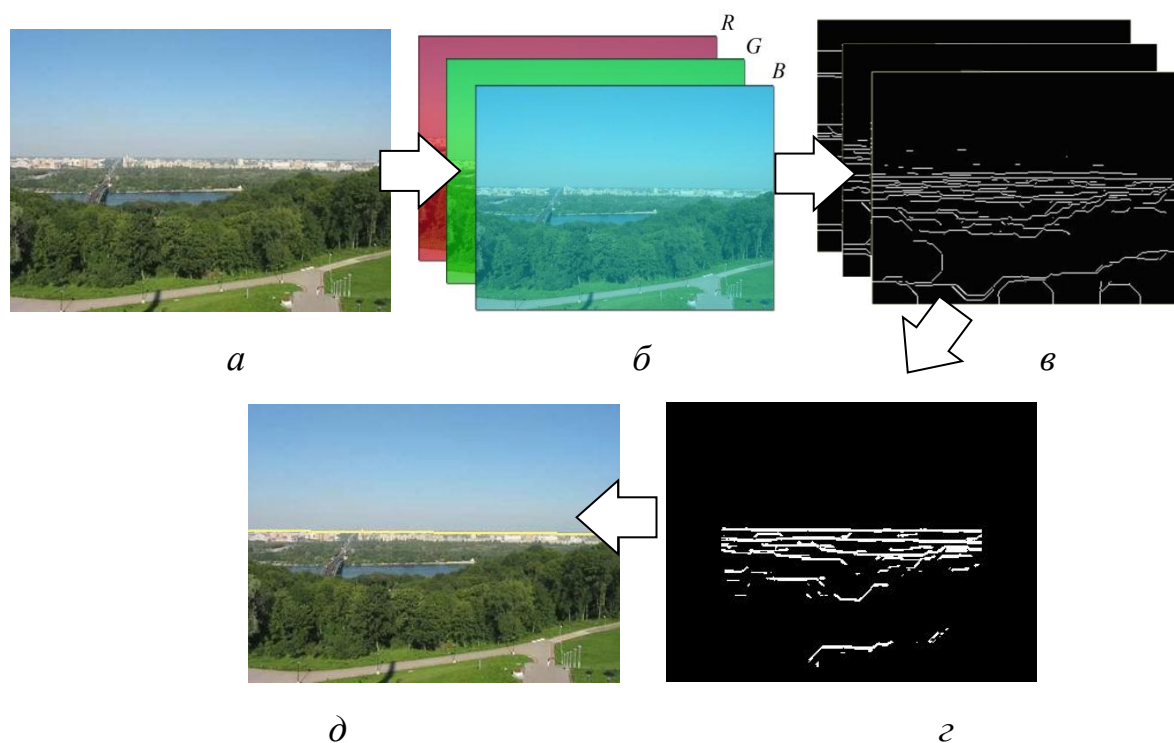


Рис. 2. Алгоритм определения горизонта (а-з) и результат его применения к исходному изображению (д)

Зная положение линии горизонта на изображении и используя закон прямой линейной перспективы, легко определить углы крена и тангажа ЛА относительно поверхности Земли.

Определение углов ориентации в реальном масштабе времени с использованием рассмотренного алгоритма было реализовано в программной

среде MatLab Simulink. В качестве сенсора была выбрана веб-камера Genius iSlim 320 VGA CMOS. Камера выдает видеосигнал с разрешающей способностью 640x480 точек с частотой 30 кадров в секунду. Этот видеосигнал поступает в блок захвата кадров MatLab.

Таким образом, работа оптического датчика горизонта (ОДГ) состоит в вычислении бортовым компьютером положения линии горизонта и величины углов крена и тангажа ЛА в реальном времени по информации от бортовой камеры.

Использование оптического датчика горизонта в составе комплексированной системы ориентации и навигации

Рассмотрим использование ОДГ в составе слабосвязанной комплексированной системы ориентации и навигации (КСОН) БПЛА, в которую также входят трехосный инерциальный измерительный модуль, приемник спутниковой навигационной системы и магнитометрический датчик курса. При этом будем считать, что эта система способна обеспечить минимальные требования к точности определения углового положения ЛА и без использования ОДГ.

Слабосвязанная схема комплексирования перечисленных измерителей строится по алгоритму линейного оптимального наблюдателя пятнадцатого порядка. Его реализация предполагает интегрирование матричного уравнения наблюдателя (15 переменных) и матричного уравнения Риккати (225 переменных). Вектор измерения базовой навигационной системы (без использования ОДГ) включает 7 переменных: ошибки определения координат места, проекций скорости и угла курса. При использовании ОДГ в качестве непосредственного измерителя углов тангажа и крена в составе КСОН вектор измерения дополнится еще двумя компонентами. Соответственно коэффициент усиления наблюдателя расширится на 2 столбца, а матрица измерения – на 2 строки. Это приведет к необходимости выполнения дополнительно нескольких операций умножения на каждой итерации. Следовательно, использование ОДГ в составе КСОН не потребует значительного увеличения производительности бортового вычислителя по сравнению с отдельным использованием датчика горизонта для определения углов тангажа и крена и базовой КСОН для определения остальных параметров движения. Тогда, при наличии вычислителя, способного обеспечить базовую КСОН и алгоритм ориентации по изображениям, расширение вектора измерения может быть целесообразно и в случае небольшого повышения точности по сравнению с точностью ОДГ.

Однако использование ОДГ в качестве дополнительного средства определения ориентации приводит к усложнению системы по сравнению с базовой, а реализация описанного выше алгоритма обработки изображений требует существенных затрат ресурсов вычислителя.

Розділ 1. Інформаційні системи

Ошибки измерения ОДГ были получены в результате экспериментов, имитирующих его работу в условиях хорошей погоды на большой высоте. Они представляют собой белые шумы со среднеквадратическими отклонениями (СКО) $0,17^\circ$ (угол тангажа) и $0,22^\circ$ (угол крена). При менее благоприятных условиях работы датчика горизонта (на малой высоте, горного рельефа, вибраций) его точность будет ниже.

С целью выяснения целесообразности использования датчика горизонта сравним СКО его погрешностей, погрешностей базовой системы без камеры и комплексированной системы, использующей ОДГ для измерения углов крена и тангажа. Для этого необходимо решать уравнение Риккати для наблюдателя.

Некоторые из результатов таких вычислений приведены в таблице.

Таблица

Ошибки систем ориентации, построенных на первичных измерителях различной точности

№	СКО ошибки в запуске		СКО ошибки ОДГ, °		СКО ошибки базовой КСОН, рад	СКО ошибки КСОН с ОДГ, рад		Отношение к СКО ошибки КСОН с ОДГ	
	акселерометра, м/с ²	ДУС, °/ч	крен	тангаж		крен	тангаж	СКО ошибки базовой КСОН	СКО ошибки ОДГ
								тангаж	тангаж
1	0,024	381	0,22	0,17	0,0032	0,0019	0,0017	1,83	1,75
2	0,024	700	0,22	0,17	0,0049	0,0034	0,0031	1,6	0,96
3	0,24	381	0,22	0,17	0,024	0,0023	0,0019	12,5	1,6
4	0,004	0,12	0,22	0,17	$41 \cdot 10^{-5}$	$14 \cdot 10^{-5}$	$12 \cdot 10^{-5}$	3,34	24,7
5	0,0001	0,12	0,22	0,17	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	$1,84 \cdot 10^{-5}$	<1,01	160
6	0,24	2000	1	1	0,025	0,0083	0,0083	3,05	2,1
7	0,004	0,12	1	1	0,0004	$27 \cdot 10^{-5}$	$27 \cdot 10^{-5}$	1,5	65

Как видно из таблицы, для некоторых конфигураций систем ориентации включение в их состав ОДГ позволяет уменьшить СКО ошибки более чем в 10 раз. Даже в случае, когда базовая КСОН определяет углы намного точнее ОДГ, совместная обработка может повысить точность в 3 раза (табл. п. 4). Однако для некоторых конфигураций (табл. пп. 2, 5) комплексирование не эффективно. Определим предельные уровни погрешностей первичных измерителей системы ориентации, при которых целесообразно слабосвязанное комплексирование с ОДГ.

Анализ данных таблицы показывает, что для более грубых датчиков угловых скоростей использование ОДГ в составе КСОН менее выгодно по сравнению с использованием ОДГ отдельно. При этом наибольшее влияние оказывает шум. Если среднеквадратическое отклонение ошибки гироскопа

скопов превышает 650 °/ч (табл. пп. 2, 6), информация от ОДГ будет точнее, чем от комплексированной системы. Для более точных гироскопов совместная оценка лучше, чем оценка от ОДГ отдельно, даже если в системе применяются самые грубые акселерометры.

При повышении точности акселерометров отношение среднеквадратических отклонений ошибок базовой системы и комплексированной системы с ОДГ увеличивается. Если точность блока акселерометров, как инклинометра, намного выше точности ОДГ, указанные СКО становятся почти равными между собой. Для улучшения точности на 33%, акселерометры базовой системы должны иметь СКО ошибки более $0,00065 \text{ м/с}^2$.

Ошибки СНС влияния на точность определения углов крена и тангажа не оказывают. Численные значения таблицы и результаты имитационного моделирования (рис. 3, рис. 4) получены при значениях СКО ошибок измерения координат и скоростей с помощью СНС 10 м и 0,1 м/с соответственно.

Рис. 3 и рис. 4 соответствуют составу системы п. 1 таблицы. Имитационное моделирование подтверждает расчеты.

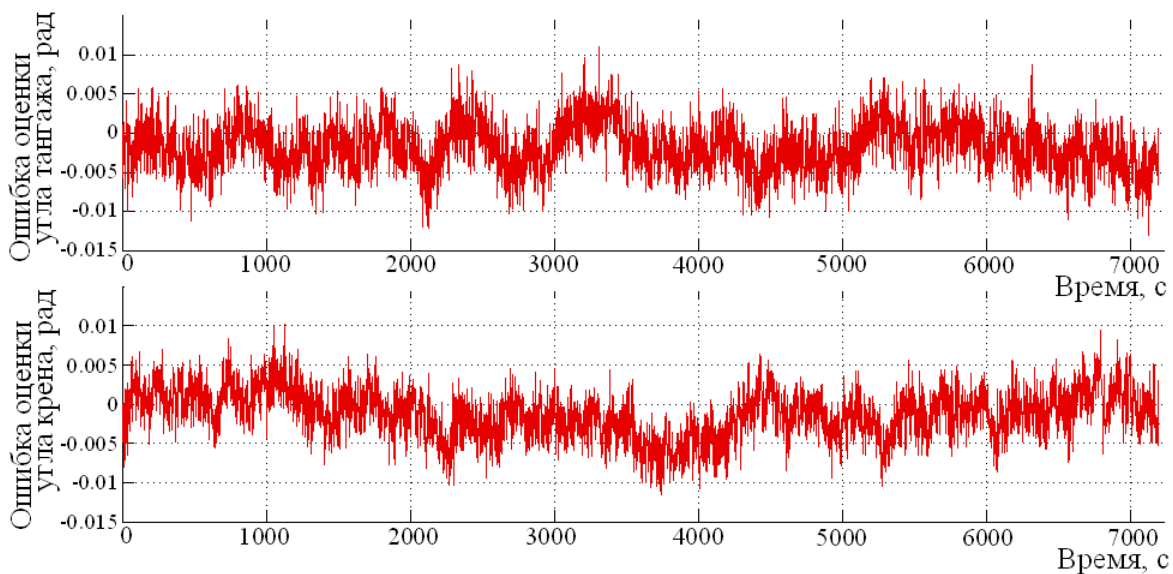


Рис. 3. Ошибки комплексированной системы ориентации с ОДГ

На рис. 4, видно, что оценка углов является смещенной. Это связано с наличием неучтенных смещений нулевых сигналов инерциальных измерителей, обусловленных их неповторимостью от запуска к запуску, или неточной калибровкой. Результаты моделирования (рис. 3) свидетельствуют о снижении этого смещения примерно в пять раз при использовании информации от ОДГ. Для других характеристик первичных измерителей возможно еще более существенное уменьшение среднего значения ошибки.

Такое снижение может быть достигнуто, если ОДГ выставлен в результате калибровочного полета с эталонной, более точной системой ориентации.

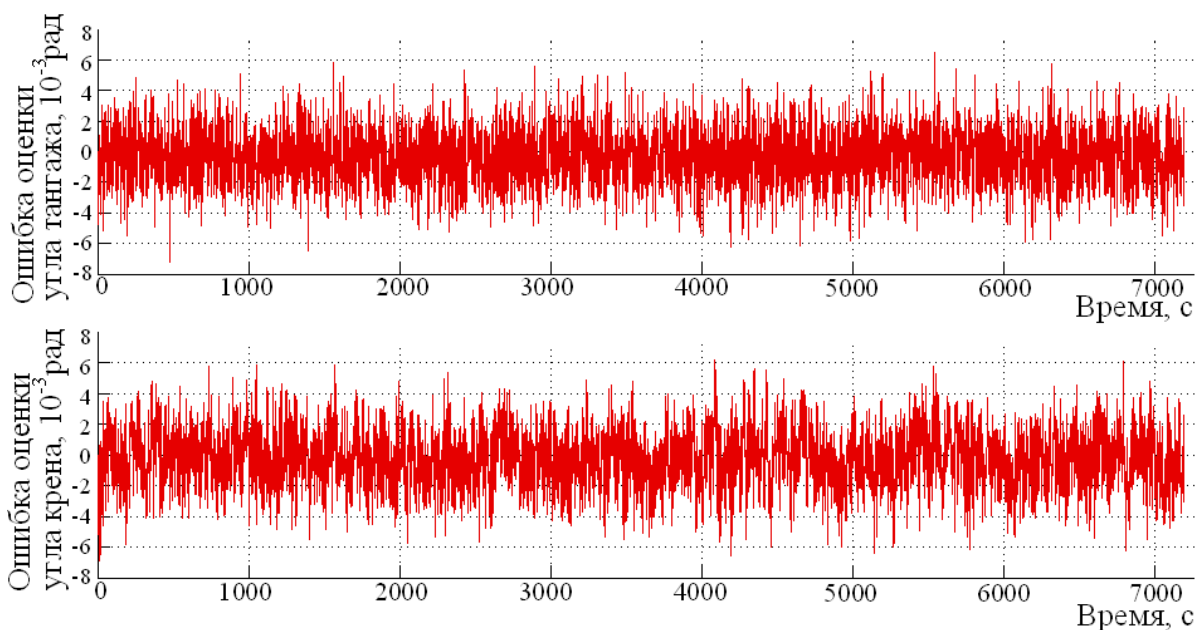


Рис. 4. Ошибки комплексированной системы ориентации без ОДГ

Выводы

Разработанный оптический датчик горизонта при благоприятных условиях может достигать точности в несколько десятых градуса. Её можно повысить комплексированием даже с инерциальными измерителями низкой точности – СКО ошибки гироскопов в запуске не должны превышать $650^\circ/\text{ч}$.

Определено также, что датчик горизонта с такой точностью целесообразно использовать в составе КСОН вместе с акселерометрами, у которых ошибка в запуске имеет СКО не менее $65 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$. Для многих конфигураций системы комплексирование позволяет уменьшить СКО ошибок определения углов более чем в 3 раза.

Важным преимуществом включения ОДГ в состав системы ориентации и навигации является возможность многократного снижения смещений ошибок определения углов при наличии значительной неповторимости нулевых сигналов акселерометров и гироскопов от запуска к запуску.

Совместная обработка информации от камеры и датчиков инерциально-спутниковой системы навигации и ориентации может быть целесообразна для широкого класса инерциальных измерителей низкой и средней точности. В системах с самыми грубыми гироскопами для измерения углов крена и тангажа ОДГ выгоднее использовать отдельно. При этом ошибки ОДГ в условиях реального полета могут превышать значения, определенные нами. Тогда класс инерциальных измерителей, которые целесообразно использовать вместе с камерой в составе КСОН, сдвинется в сторону более низкой точности и может охватить наиболее грубые среди используемых

на современных БПЛА датчики, а также большую часть датчиков средней точности.

Список использованной литературы

1. *Austin, Reg.* Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment. Wiley, John & Sons, Incorporated. 2010, pp. 372 | ISBN-10: 1600867596 | ISBN-13: 9781600867590.
2. *George, M.; Sukkarieh, S.* 2005. Tightly Coupled INS/GPS with Bias Estimation for UAV Applications, in ACRA'05: Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation. Sydney, Australia.
3. *Plekhanov, V. E.; Tikhonov, V. A.; Veremeenko, K. K.* 1998. Integrated Inertial & Satellite Navigation System Based on Micromechanical Module, in 5th Saint Petersburg International Conference of Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg: CSRI Elektropribor, pp. 95–101.
4. *Winkler, S.; Schulz, H.-W.; Buschmann, M.; Kordes, T.; Vörsmann, P.* 2004. Visual Aided Low-Cost GPS/INS Integration for Autonomous MAV Navigation, in Gyroscopy and Navigation 47 (2004), pp. 36–48.
5. *Мальшева Ю. А.* Комплексированная система ориентации и навигации с оптическим датчиком горизонта [Текст] / Ю. А. Мальшева // Інформаційні системи, механіка та керування. – К.: НТУУ«КПІ», 2012. - Випуск 8. – ISSN: 0203-3771.
6. *Ettinger, S. M.; Nechyba, M. C.; Ifju, P. G.; Waszak, M. R.* 2002. Vision-Guided Flight Stability and Control for Micro Air Vehicles. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, October 2002.
7. *Dusha, D.; Walker, R.; Boles, W.* 2007. Fixed-wing attitude estimation using vision based horizon detection. 22nd International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, 16–18 April 2007.
8. *Мальшева Ю. А.* Применение методов компьютерного зрения для построения алгоритмов распознавания горизонта / Ю. А. Мальшева // Механіка гіроскопічних систем. – К.: НТУУ«КПІ», 2008. - Випуск 19. – С. 174-182. – ISSN 0203-3771.
9. *Malysheva J. A.* 2013. Integrated Aircraft Navigation system. 2013 IEEE International Conference “Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments” Proceedings. – К.: Освіта України, 2013, pp. 169-172.
10. *Cornall, T.; Egan, G.* 2005. Heaven and Earth: How to tell the difference. Paper no WC0055, Australian International Aerospace Congress, Melbourne, Australia, March 2005.
11. *Gonzalez, R. C.; Woods, R. E.* 2002. Digital image processing. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall.