

ФЕНОМЕН ПЕРСПЕКТИВЫ В ТЕХНИЧЕСКОМ ЗРЕНИИ

Д. Д. Чесалин, И. И. Соломатин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Техническое зрение основано на автоматической обработке изображений предметов полученных с помощью цифровой камеры с объективом [1]. Сферой наших интересов является применение технического зрения для построения математической модели трехмерного объекта. Наряду с обычными объективами в начале третьего тысячелетия начали появляться телецентрические объективы, объективы с изменяемой перспективой и перипетрические объективы. Производители систем технического зрения используют слово «телецентрический» в рекламных целях.

Теория линейной перспективы была разработана в эпоху Возрождения, основывалась на законах оптики и имела подтверждение на практике. Прямая перспектива долго признавалась как единственное верное отражение мира в картинной плоскости. Однако в позднеантичном и средневековом искусстве существовала обратная перспектива – вид перспективы, при которой изображенные предметы представляются увеличивающимися по мере удаления от наблюдателя. Среди причин появления феномена обратной перспективы называли неумение художников изображать мир, каким его видит наблюдатель [2]. Поэтому такую систему перспективы считали ошибочным приемом, а саму перспективу – ложной. Однако обратная перспектива, как и прямая, имеет строгое математическое описание и физическую реализацию.

Тип перспективы определяется взаимным расположением предмета и входного зрачка [3, 4]. Взаимное расположения экрана (матрицы цифровой камеры) и выходного зрачка определяет изменение масштаба изображения при сдвиге экрана и не влияет на перспективу. В докладе предложено называть перспективу входным параметром, а результат взаимного расположения экрана и выходного зрачка – выходным параметром. Совокупность входного и выходного параметра системы предложено называть режимом отображения. Введена двухбуквенная классификация режимов отображения в зависимости от входного и выходного параметра. На примере конкретных схем показано, как добавление оптических элементов приводит к появлению новых комбинаций входных и выходных параметров. Введено понятие отрицательной перспективы, как варианта расположения входного зрачка внутри предмета.

Анализ отображения объемного предмета на плоскости

В литературе объективы принято делить на три типа: энтоцентрические, телецентрические и перипетрические, как показано на рис. 1.

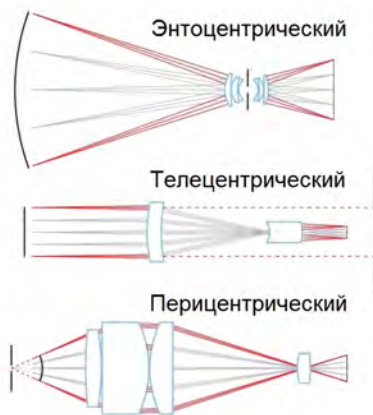


Рис. 1. Типы объективов

Энтоцентрический объектив – пучки сходятся на пути к линзе.

Телецентрический объектив – пучки параллельны на пути к линзе.

Перипетрический объектив – пучки расходятся на пути к линзе.

Такая классификация не совсем корректна. Например, во втором случае в действительности приведен бителецентрический объектив, у которого параллельны как входные, так и выходные пучки. Для телецентрического объектива выходной пучок может как сходить, так и расходиться. В третьем случае мы получим прямую перспективу, если расположить предмет до точки расхождения лучей.

В учебниках по оптике [3,4] четко определен вид перспективы в зависимости от положения предмета относительно входного зрачка. Если зрачок располагается на бесконечности, то перспектива будет изометрической (телецентрической). Если предмет находится до зрачка, то перспектива будет прямой (энтоцентрической), а если после зрачка, то обратной (перипетрической) [5]. Здесь необходимо уточнить, что предмет и экран всегда являются материальными, оптическая система расположена справа от предмета, то есть после предмета, а экран распо-

ложен справа от оптической системы. Входной зрачок может быть как материальным, так и изображением материального зрачка в предстоящей части оптической системы. Входной зрачок может располагаться в произвольном месте, например, до предмета или между предметом и оптической системой или после оптической системы. Предлагаем называть перспективу называть входным параметром.

По аналогии с входным параметром введем выходной параметр. Выходной параметр определяет изменение размера изображения при сдвиге экрана. Корректно этот параметр задается взаимным расположением экрана и выходного зрачка. Выходной зрачок тоже может быть как материальным, так и изображением материального зрачка в последующей части оптической системы. Выходной зрачок так же может располагаться в произвольном месте.

Если положение зрачка на бесконечности рассматривать как отдельное значение, то каждый параметр имеет три значения и, следовательно, режимов отображения может быть 9. Введем обозначения для значений входного параметра:

Е – предмет находится перед входным зрачком;
Т – входной зрачок находится на бесконечности;

Р – предмет находится за входным зрачком.

Введем обозначения для значений выходного параметра:

І (increase) – экран находится за выходным зрачком;

Т – входной зрачок находится на бесконечности;

Д (decrease) – экран находится перед выходным зрачком.

Сочетание входного и выходного параметра дают 9 режимов отображения, см. таблицу

Режимы отображения

Входной параметр	Выходной параметр		
	І	Т	Д
Е	ЕІ	ЕТ	ЕД
Т	ТІ	ТТ	ТД
Р	РІ	РТ	РД

Приведем графическое представление режимов отображения по входным и выходным параметрам, где координатные оси будут:

х – координата входного зрачка относительно положения предмета;

у – координата выходного зрачка относительно положения экрана.

Режим отображения в зависимости от заданных параметров х и у показан на рис. 2.

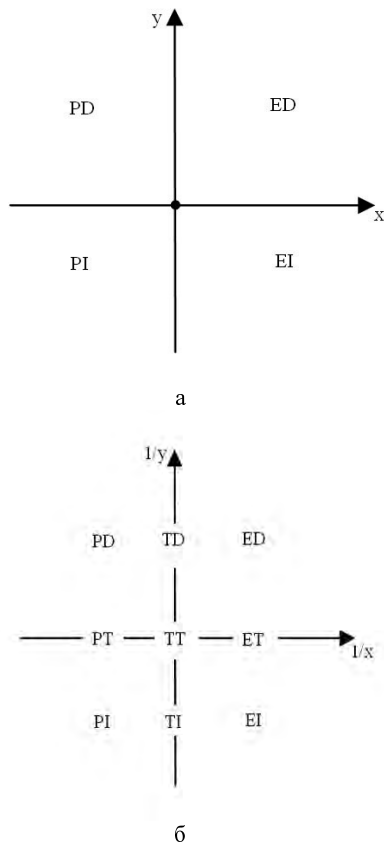


Рис. 2. Режим отображения в зависимости от входных параметров: а – в прямых координатах, б – в обратных

Объектив будет телецентрическим по входу или выходу, когда входной или выходной зрачки располагаются на бесконечности. На рис. 2а телецентрические режимы будут на бесконечностях, поэтому представим данный график в обратных координатах, что показано на рис. 2б. В обратных координатах телецентрические режимы лежат на координатных осях. На рисунке видно, при каких параметрах будет реализовываться каждый из 9 режимов отображения.

Для анализа хода лучей нам нужен трехмерный предмет.

На рис. 3 показан кубик.

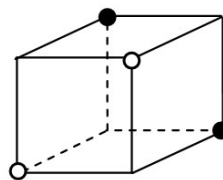


Рис. 3. Кубик

Двумя точками (без заливки) обозначим вершины кубика на дальней от оптической системы грани, двумя точками (с заливкой) – на ближней грани. Для того чтобы точки с заливкой и без заливки не

совпадали в ортогональных проекциях, они расположены на скрещенных диагоналях противоположных граней кубика.

Камера-обскура

Рассмотрим изображение кубика в камере-обскуре. Камера-обскура состоит из диафрагмы и экрана, расположенного за ней. Диафрагма задает конус лучей, идущих от точек предмета на экран. Ход лучей через камеру-обскуру показан на рис. 4.

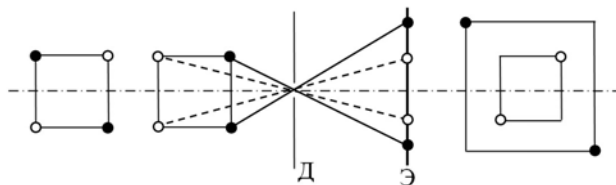


Рис. 4. Ход лучей через камеру-обскуру

Слева показана осевая проекция кубика, справа – изображение на экране. Дальнюю от оптической системы грань кубика будем в дальнейшем называть дальней гранью кубика, ближнюю грань кубика к оптической системе будем называть ближней гранью. Пусть ребро кубика равно h , расстояние от ближней грани кубика до диафрагмы равно a . Введем понятие «коэффициент перспективы» (КП) – отношение размеров изображений на экране ближней и дальней граней кубика. Из рисунка видно, что КП также можно посчитать как отношение расстояния от диафрагмы до дальней грани к расстоянию до ближней грани по формуле:

$$КП = (a + h)/a = 1 + h/a \quad (1)$$

Входной и выходной зрачки совпадают с диафрагмой. Предмет находится перед входным зрачком, поэтому значение входного параметра всегда будет E . Экран находится за выходным зрачком и при удалении экрана от оптической системы размер изображения увеличивается, поэтому значение выходного параметра всегда будет I . Реализуется режим отображения EI . Коэффициент КП для камеры-обскуры всегда больше единицы. На рис. 5 показано изображение, сделанное через камеру-обскуру.



Рис. 5. Изображение коробки в камере-обскуре

Видно, что параллельные линии сходятся на линии горизонта, поэтому перспектива здесь является прямой.

Следующий по сложности способ получения изображения предмета основан на применении линзы, совмещенной с диафрагмой.

Если диаметр диафрагмы стремится к нулю, то ход лучей в оптической системе будет такой же, как и в случае камеры-обскуры. Так как лучи проходят через оптический центр линзы и не преломляются, то до экрана дойдут по такому же пути, что и в аналогичном случае без линзы. При увеличении диаметра диафрагмы меняются светосила и глубина резкости, но это не влияет на параметры перспективы. Режим отображения и коэффициент КП будет такой же, как и в случае с камерой-обскурой, и будет всегда больше 1. Стоит отметить, что большинство фотоаппаратов представляют собой как раз такую оптическую систему. Изображение предмета в прямой перспективе, сделанное через объектив, показано на рис. 6.



Рис. 6. Изображение коробки в прямой перспективе

Оптические системы с диафрагмой и независимой линзой

Следующий по сложности способ получения изображения предмета основан на совместном применении независимой линзы и диафрагмы. В данном случае между линзой и диафрагмой есть определенное расстояние, от которого зависят характеристики оптической системы. Ход лучей с линзой и диафрагмой, расположенной на фокусном расстоянии за линзой, показан на рис. 7.

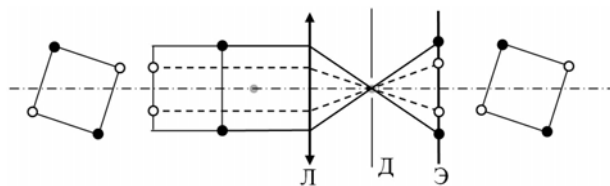


Рис. 7. Ход лучей в системе с линзой и диафрагмой

Если диафрагма расположена в заднем фокусе линзы, то входные пучки будут параллельными. После прохождения через диафрагму пучки будут рас-

ходить. Чтобы увидеть изображение кубика в его исходных размерах, необходимо поставить экран на двойном фокусном расстоянии от линзы. Режим отображения будет ТI.

При смещении диафрагмы к линзе входной лучок из положительной бесконечности направляется к предмету, оставаясь справа от него, поэтому появляется прямая перспектива. При смещении диафрагмы от линзы входной лучок из отрицательной бесконечности направляется к предмету, оставаясь слева от него, поэтому появляется обратная перспектива, как показано на рис. 8.



Рис. 8. Изображение коробка в обратной перспективе

Изображение получено с помощью линзы и камеры-обскуры. В системе с линзой и независимой диафрагмой после нее можем получить три режима отображения: EI, TI, PI.

Ход лучей с линзой и диафрагмой, расположенной в переднем фокусе линзы, показан на рис. 9.

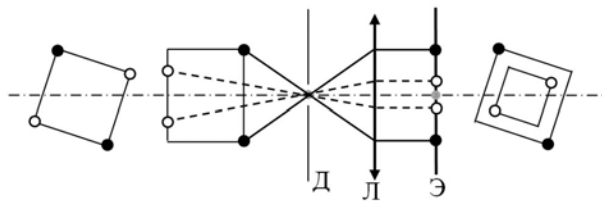


Рис. 9. Ход лучей в системе с линзой и диафрагмой в переднем фокусе линзы

При $a = 1.5$, $h = 1$, $F = 2$ получаем КП $\sim 1,7$. Режим отображения будет ET, так как входной лучок расположен за предметом, а выходной на бесконечности. Если расстояние между линзой и диафрагмой больше фокуса, то при удалении экрана от оптической системы изображение будет уменьшаться. Если меньше, то увеличиваться. В системе с линзой и диафрагмой до нее можно получить три режима отображения: EI, ET, ED.

График режима отображения в зависимости от взаимного расположения диафрагмы и линзы показан на рис. 10, где x – координата диафрагмы относительно линзы, а F – фокуса линзы.

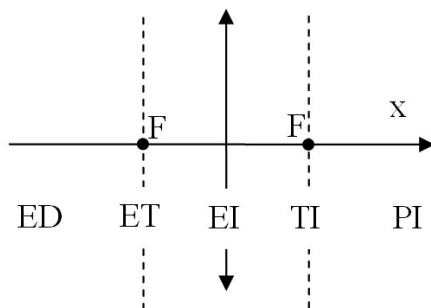


Рис. 10. Режим отображения в зависимости от положения диафрагмы

Сочетание входного и выходного параметра в системе с диафрагмой и одной независимой линзой дают только 5 из 9 режимов отображения.

Рассмотрим случай с дополнительной линзой на диафрагме.

Ставим вторую линзу с диафрагмой в фокусе первой линзы (расстояние между линзами делаем тоже равным фокусу первой линзы). Экран ставим на задний фокус второй линзы. Ход лучей в такой системе показан на рис. 11.

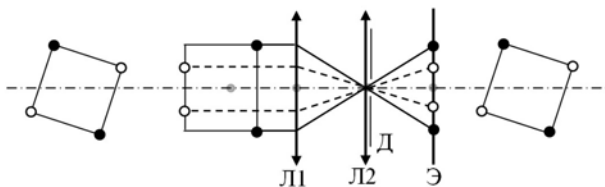


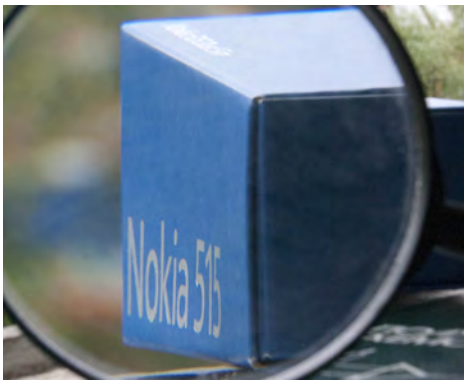
Рис. 11. Ход лучей для линзы и линзы с диафрагмой

Ход лучей и режим отображения не отличаются от случая линзы и диафрагмы расположенной за линзой, показанного на рис. 7. В системе с линзой и объективом после нее получаются те же три режима отображения в зависимости от расстояния между ними: EI, TI, PI.

Если расстояние от линзы до объектива равно фокусу первой линзы, то предмет будет виден в изометрии, как показано на рис. 12.



Рис. 12. Изображение коробки в телецентрическом режиме



а



б

Рис. 13. Изображения в обратной перспективе.



а



б

Рис. 14. Изображения двухметровой коробки из-под телевизора: а – в прямой перспективе, б – в обратной перспективе

Если расстояние между линзой и объективом больше фокусного расстояния линзы, то изображение будет в обратной перспективе, как показано на рис. 13а. Обратная перспектива встречается в некоторых советских мультфильмах, как показано на рис. 13б.

Обратная перспектива может быть получена и для существенно больших предметов, как показано на рис. 14б.

Для получения изображения понадобилась линза с метровым диаметром. Без линзы перспектива остается прямой, как показано на рис. 14а.

Оптические системы с диафрагмой и двумя независимыми линзами

В схеме с диафрагмой и двумя независимыми линзами появился дополнительный параметр – расстояние от диафрагмы до второй линзы. Для диафрагмы, расположенной между линзами, в зависимости от расстояния между линзами и диафрагмой, входной и выходной пучки могут сходиться, расходиться и быть параллельными.

Рассмотрим случай настроенного телескопа с двумя одинаковыми линзами и диафрагмой, расположенной в общем фокусе линз.

Ход лучей в такой системе показан на рис. 15.

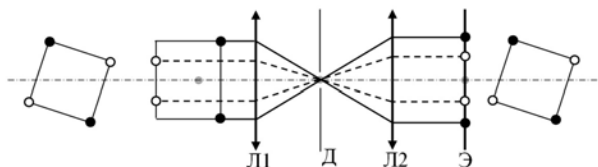


Рис. 15. Ход лучей в симметричном настроенном телескопе

Лучи, участвующие в перестроении, будут идти параллельно и до первой линзы, и после второй. Такие системы называются бителецентрическими объективами. КП системы равен 1 и не зависит от положения предмета. Масштаб изображения не изменяется при смещении экрана. В нашей классификации режим отображения будет ТТ.

В схеме с диафрагмой и двумя независимыми линзами реализуется полный набор режимов отображения.

Оптические системы с отрицательной перспективой

Рассмотрим систему, состоящую из предмета в форме параллелепипеда и линзы. Длина параллелепипеда $h = 5,5$. Расстояние от параллелепипеда до линзы $d = 0,5$. Фокус линзы $F = 2$. Ближняя грань такого предмета лежит до фокуса линзы, а дальняя – после фокуса. Координата входного зрачка x отсчитывается относительно линзы. Построим функцию зависимости КП от координаты входного зрачка, расположенного до линзы, подставляя в формулу (1) $a = d + x$:

$$\text{КП} = 1 + h/(d + x) \quad (2)$$

Зависимость КП от координаты изображения материального зрачка, расположенного за линзой, находится по формуле:

$$\text{КП} = 1 + h/(d + x') \quad (3)$$

Здесь x' – координата изображения материального зрачка, находится из формулы тонкой линзы.

Подставляя значение x' в формулу (3), получим:

$$\text{КПМ} = 1 + h(F - x)/(dF - dx + Fx) \quad (4)$$

График КП и КПМ в зависимости от зрачка показан на рис. 16.

На графике видно, что если входной зрачок лежит внутри предмета, то КП будет отрицательным. Это означает, что изображения ближней и дальней грани предмета будут перевернуты относительно друг друга, но для непрозрачного предмета изображение дальней грани не будет видно. Для прозрачного предмета будут видны обе грани.

Это объясняется тем, что для определенной внутренней зоны предмета коэффициент увеличения

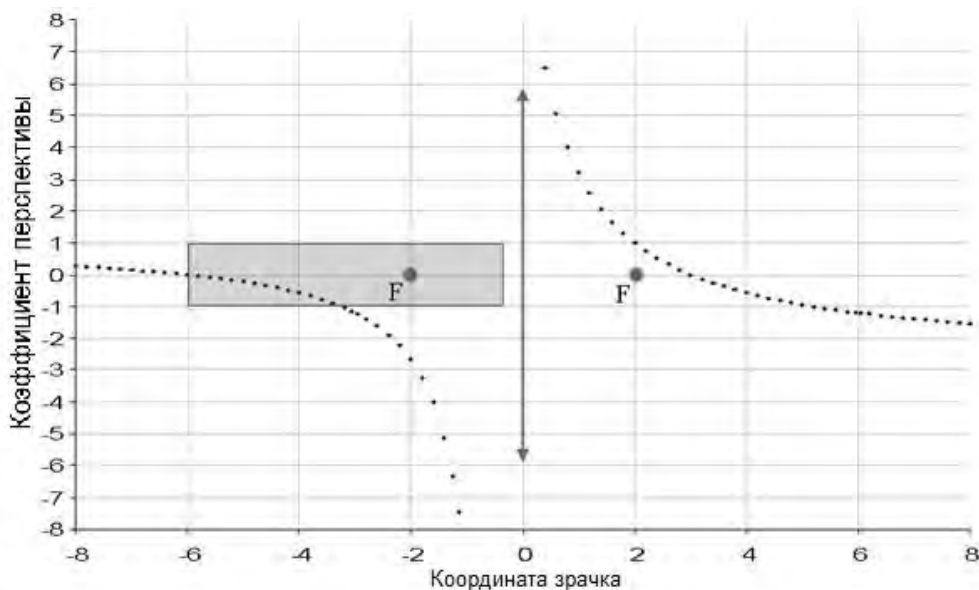


Рис. 16. График зависимости КП и КПМ от координаты зрачка

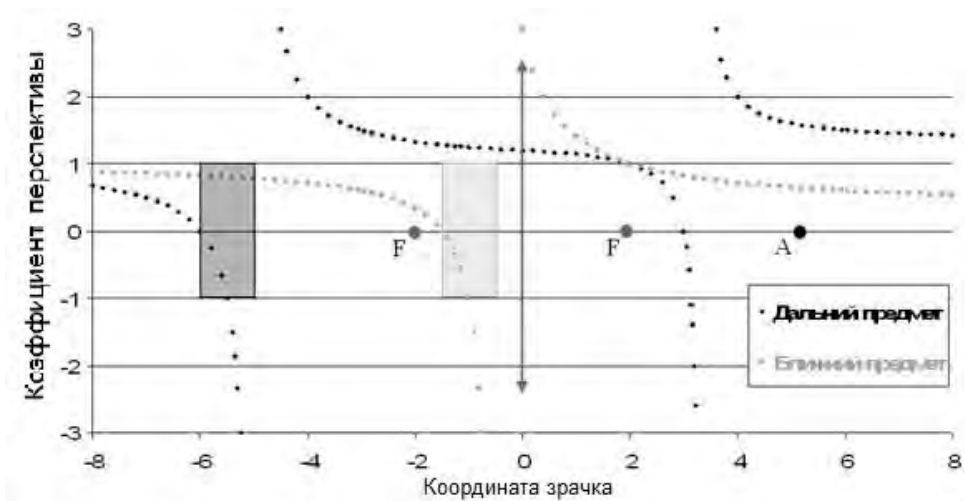


Рис. 17. График зависимости КП и КПМ дальнего и ближнего предметов от координаты зрачка



а



б

Рис. 18. Сочетание разных перспектив: а – в оптической системе, б – на иконе

системы стремится к бесконечности.

Разобьем этот предмет на два небольших предмета для исключения этой внутренней зоны. Один предмет располагается за фокусом и его дальняя грань совпадает с дальней гранью большого предмета, другой предмет располагается ближе фокуса и его ближняя грань совпадает с ближней гранью большого предмета. График зависимости КП и КПМ дальнего и ближнего предметов от координаты зрачка показан на рис. 17.

Если материальный зрачок находится в заднем фокусе линзы – точке F с координатой $x = 2$, то входной зрачок оказывается на бесконечности и реализуется телецентрический режим для обоих предметов. На всем графике это единственная точка, где $\text{КПМ} = 1$.

Если материальный зрачок находится в точке A с координатой $x = 5,2$, то КПМ двух предметов обратные и их произведение равно 1. Точка A находится в диапазоне, в котором КПМ дальнего предмета больше единицы, а ближнего – меньше. При этом

входной зрачок находится между предметами и ближний к линзе предмет виден в обратной перспективе, а дальний в прямой перспективе виден перевернутым, как показано на рис. 18а.

В кадре присутствуют три вида перспективы: Без линзы перспектива прямая, изображение прямое;

С линзой на переднем плане перспектива обратная (параллельные линии конденсатора расходятся на линии горизонта), изображение прямое;

С линзой на дальнем плане перспектива прямая (параллельные линии дома сходятся на линии горизонта, угол дома находится дальше от оптической системы), изображение перевернутое.

На рис. 18б показана репродукция копии иконы Андрея Рублева. Кроме обычного изображения в обратной перспективе представлено изображение здания в прямой перспективе на заднем плане. Такое сочетание встречается и на других иконах.

Исследования получения изображений объемных предметов будут продолжены.

Литература

1. Чуриловский Н. В. Теория оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1966.
2. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975.
3. Сивухин Д. В. Общий курс физики. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
4. Раушенбах Б. В. Системы перспективы в изобразительном искусстве. М.: Наука, 1986.
5. Патент № 2042161 РФ. Объектив обратной перспективы. Н. Г. Кувшинов, В. И. Решетников 1995.