

УДК 711.11

А.В. Астапенко, В.Л. Шведов,
А+С Консалт, г. Киев,
к. т. н., професор Н.Н. Осетрин, Д.А. Беспалов,
Киевский национальный университет строительства и архитектуры

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕШЕХОДНЫХ ПОТОКОВ

Приводятся принципы и методы моделирования пешеходных потоков. Описаны существующие модели, даны примеры их использования.

Для эффективного планирования транспортных узлов на улично-дорожной сети городов, помимо изучения и моделирования потоков транспортных средств, необходимо уделять должное внимание и пешеходным потокам. К сожалению, в настоящий момент в градостроительной практике организации движения пешеходных потоков по улично-дорожной сети и, особенно, на ее узлах, практически не уделяется внимания. Еще Дональд Дрю утверждал, что «для достижения безопасности движения достаточно разделить транспортные и пешеходные потоки. В этом случае они перестают оказывать влияние друг на друга». Поведение пешеходов является достаточно сложным процессом, поэтому при планировании объектов с высокой плотностью пешеходного движения и ограниченным пространством для оптимизации потоков пешеходов, гарантированного предотвращения дискомфорта и снижения задержек, а также повышения безопасности движения, целесообразно проводить имитационное моделирование. Оно необходимо в том числе для решения следующих задач:

- взаимодействие пешеходов с другими видами транспорта;
- проведение мероприятий с большим скоплением людей;
- массовая эвакуация людей с мест их концентрации;
- проверка работы пропускных систем.

За последние годы были разработаны несколько моделей для моделирования потоков пешеходов. Почти все они используют законы физики для моделирования движения, сводя пешеходов к элементарным частицам. Эти модели можно сгруппировать по следующим признакам:

1) Модель магнитных сил была предложена С. Оказаки и С. Матсушита. В этой модели пешеходы представлялись в виде магнитных зарядов находящихся в магнитном поле. Пешеходы и препятствия представлялись положительным зарядом, а цель движения отрицательным;

2) Модели, использующие теорию очередей для описания движения пешеходов в терминах вероятностных функций;

3) Клеточные автоматы это простой и быстрый способ для моделирования движения пешеходов. В клеточных автоматах пространство представляется сеткой. В каждой ячейке может поместиться только один пешеход. Движение моделируется за счет перехода пешеходов между клеточками по определенным правилам;



Рис. 1. Моделирование пешеходных потоков на станции метро

4) Газо-кинетическая модель рассматривает пешеходов как молекулы в разжиженном газе. Точная скорость и положение пешеходов-молекул неизвестно, вместо этого известно статистическое распределение частиц, исходя из уравнения Больцмана;

5) Модель социальных сил, разработанная Хелбингом и Молнаром, использует Ньютоновскую механику для описания движения пешеходов. Силы порождаются социальными взаимодействиями.

Модель социальных сил. Данная модель разработана D. Helbing и P. Molnar [1]. В ней различные мотиваторы и воздействия на пешехода выражены в форме различных сил, показанных на рис. 2.

Модель использует ньютоновскую динамику для описания движения пешеходов. Она демонстрирует несколько естественных поведенческих особенностей пешеходов в процессе движения:

1. Пешеходы выбирают самый короткий путь;
2. Пешеходы двигаются с индивидуальной скоростью, с учетом ситуации, пола, возраста, ограничений и др.;
3. Пешеходы держатся на определенном расстоянии друг от друга.

Дистанція залежить від щільності потоку пішоходів і швидкості руху. Движение пешехода в модели социальных сил описывается суммой действующих на него сил. Решая полученную систему дифференциальных уравнений, можно узнать положение в пространстве, скорость и ускорение пешехода в любой момент времени. Существует множество численных методов для решения дифференциальных уравнений: метод Эйлера, метод предиктора-корректора, методы Рунге-Кутты, методы Гира. Они различаются по производительности и точности, имеет смысл подбирать метод для конкретной задачи. Суммарная социальная сила, действующая на пешехода, зависит не только от его положения в пространстве, но и от его скорости, поэтому метод Гира пятого порядка является оптимальным для данной задачи, т.к. для нахождения решения требуется меньшее число операций.

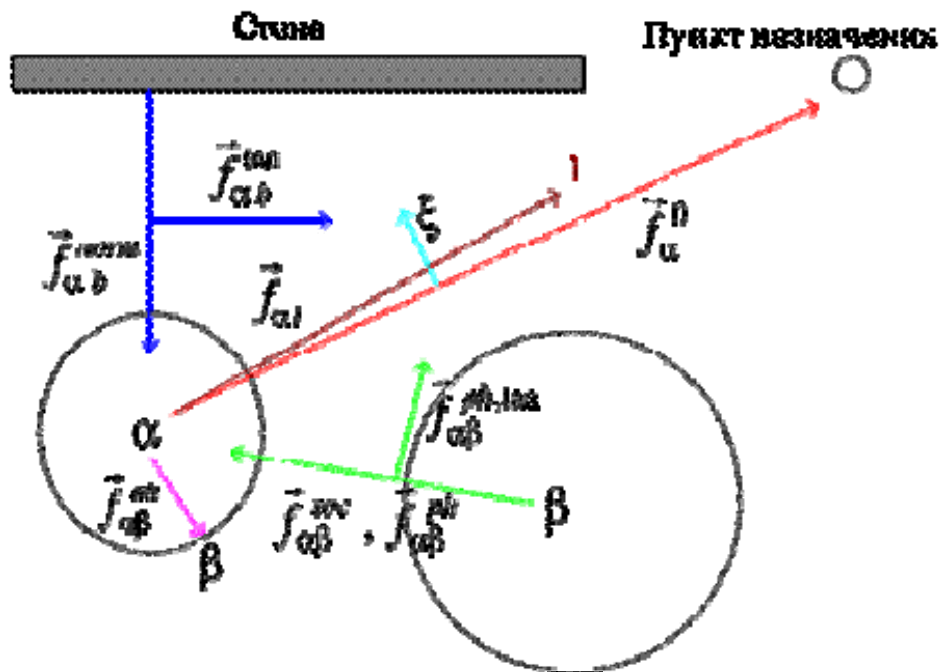


Рис.2. График модели социальных сил пешехода

Имитационное моделирование. В PTV Vision® VISSIM как и во всех имитационных моделях принцип действия основывается на циклическом процессе. Цикл повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто условие остановки. Упрощенно алгоритм выглядит следующим образом:

1. Установить параметры модели
2. Если условие окончания цикла не достигнуто, то
 - 2.1 Для каждого пешехода
 - 2.1.1 Рассчитать движущую силу
 - 2.1.2 Для всех других пешеходов

- 2.1.2.1 Рассчитать социальную силу
- 2.1.2.2 Добавить её к движущей силе
- 2.1.3 Для всех стен и препятствий
 - 2.1.3.1 Рассчитать силу взаимодействия
 - 2.1.3.2 Добавить её к движущей силе
- 2.1.4 Рассчитать новые значения положения, скорости и ускорения пешехода

3. Окончание цикла

После установки параметров модели, управление передается в основной цикл, в котором вычисляются силы, действующие на каждого пешехода. Чтобы рассчитать силу, действующую на каждого пешехода, необходимо просуммировать силы от всех других пешеходов, стен, препятствий и аттракторов, что приводит к сложности алгоритма. Сложность алгоритма достаточно требовательна к вычислительным ресурсам ПК, при том, что некоторые модели потоков пешеходов имеют сложность n .

Для наибольшей наглядности рассмотрим экспериментальный пример, эмпирические данные для которого возьмем из работ [1,2]. Ввиду большого количества параметров не будем рассматривать их все, укажем лишь самые важные. В соответствии с данными из работ [1,2] скорость пешеходов распределена по нормальному закону с медианой 1.34 м/с и стандартным отклонением 0.26 м/с. Пешеходы входят в помещение в случайных позициях.

Первый эксперимент моделирует движение двух встречных потоков пешеходов по просторному коридору. На рис.3 показано одно из состояний модели в процессе работы.

На рис. 4 показана реализация движения двух встречных потоков пешеходов по просторному коридору в программном комплексе PTV Vision® VISSIM, например, для внеуличных пешеходных переходов с высокой интенсивностью пешеходного потока.

Мы видим сформированные, так называемые, полосы движения, несмотря на то, что движение пешеходов начинается в случайных позициях. Движение полосами оптимально, что подтверждается жизненным опытом и математическими расчетами. Каждый пешеход руководствуется достаточно простыми правилами при движении, но явления демонстрируемые системой выходят за рамки поведения пешеходов. Такие явления самоорганизации проявляются в многоагентных системах, какой модель социальных сил и является. Данный феномен был зафиксирован многими исследователями движения потоков пешеходов и исследователями модели социальных сил в частности, что говорит в пользу правильности её реализации. Следует также отметить, что количество полос движения линейно зависит от ширины

коридора. Во втором эксперименте демонстрируется прохождение дверного проема в коридоре двумя встречными потоками пешеходов.

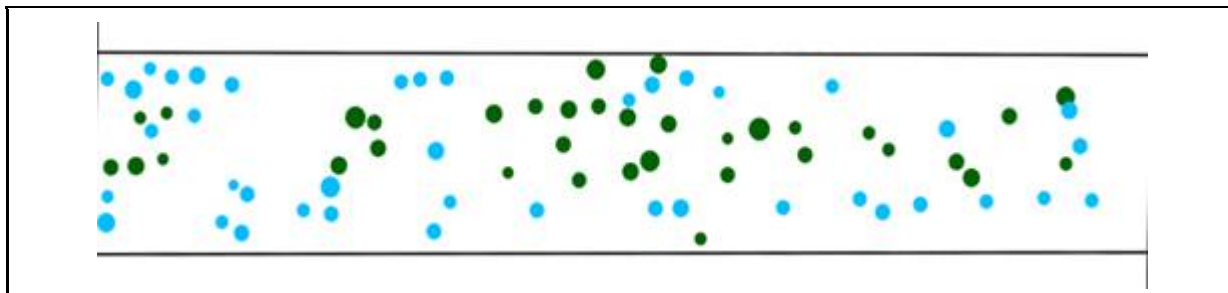


Рис.3. Иллюстрация эксперимента движение двух встречных потоков пешеходов по просторному коридору

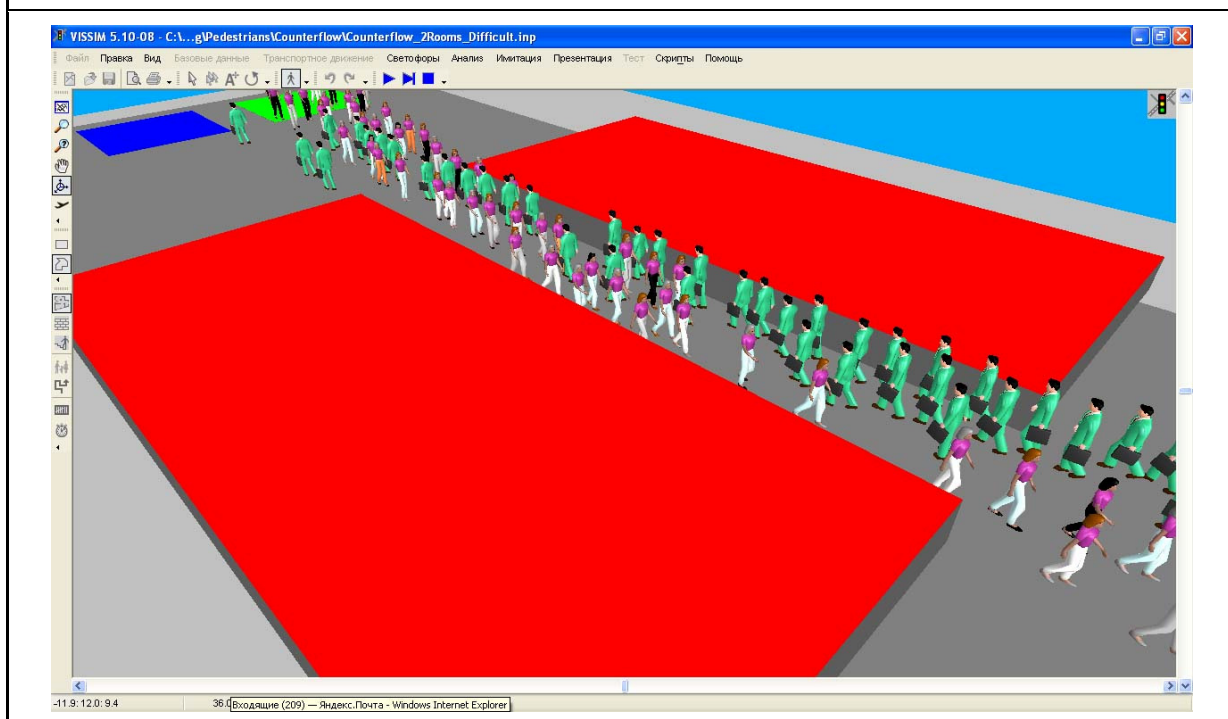


Рис.4. Реализация движения двух встречных потоков пешеходов по просторному коридору в программном комплексе PTV Vision® VISSIM

На рис.5 видно, что в то время, пока один поток пешеходов проходит через дверной проём, другой поток вынужден ждать. Но через некоторое время инициатива поменяется. Такое явление самоорганизации получило название колебание инициативы потоков пешеходов. Оно хорошо подтверждено как наблюдателями, так и исследователями. Для того, чтобы при моделировании встречных потоков не происходило «наложения» одной модели пешехода на другую в модели социальных сил применяется концепция «упругого удара».

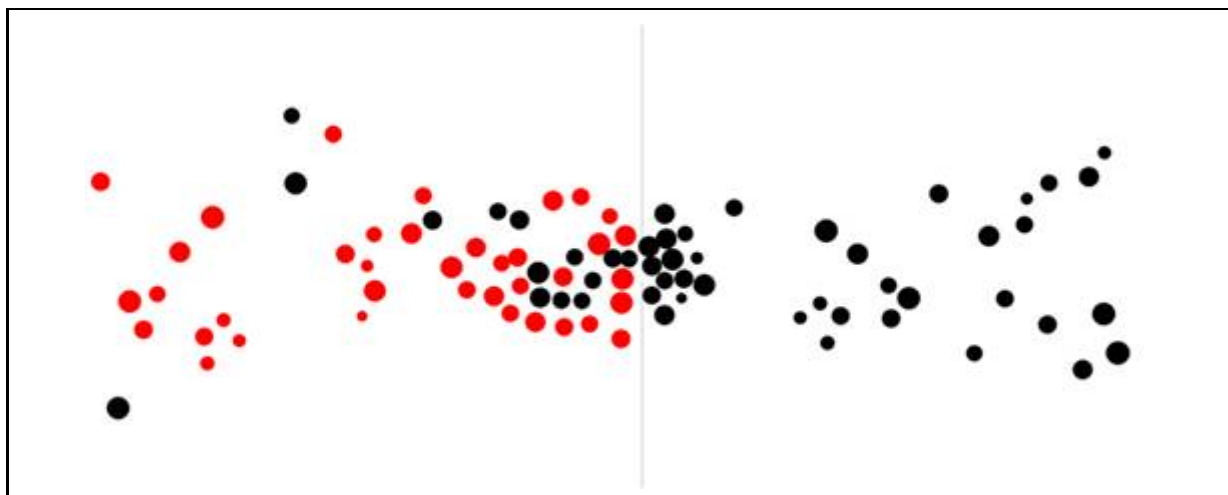


Рис.5. Иллюстрация эксперимента прохождения дверного проема в коридоре двумя встречными потоками пешеходов

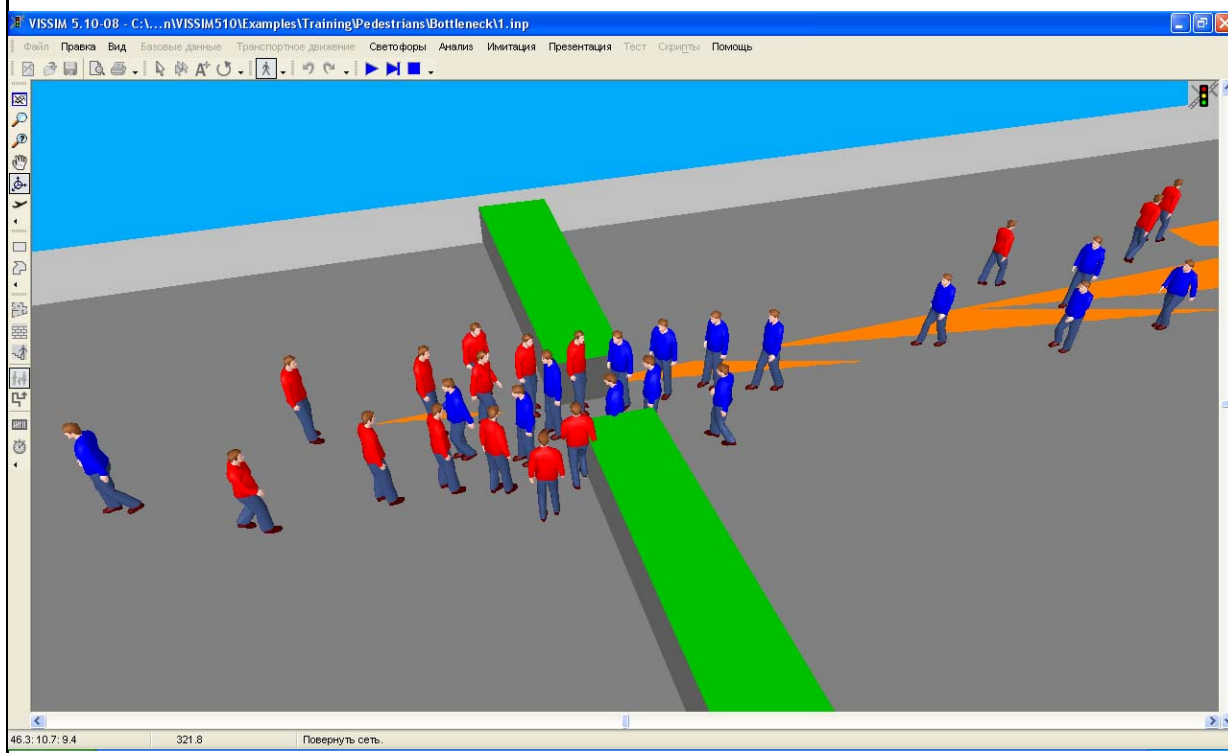


Рис.6. Прохождение дверного проема в коридоре двумя встречными потоками пешеходов. Модель программного комплекса PTV Vision® VISSIM

Одним из наиболее актуальных примеров проектов является модель организации пешеходного движения в Олимпийском парке г. Сочи. При проверке организации его работы при помощи PTV Vision® VISSIM были решены, в том числе, следующие задачи:

1) Количество людей, которое находится в Олимпийском парке на момент эвакуации, составляет 90 730 человек. В результате выполнения моделирования были сделаны следующие предложения по сокращению

времени эвакуации людей с объекта до 15 мин.: расширить существующие и добавить один эвакуационный выход.

2) Вход людей на объект Олимпийского парка обеспечивают пропускные турникеты. В ходе выполнения имитации организации пешеходных потоков в Олимпийском парке была выявлена нехватка турникетов для пропуска посетителей, вследствие чего создавалась большая очередь. Количество турникетов было увеличено. Было рассчитано максимальное и минимальное время доставки людей до спортивных объектов по каждому варианту.

3) Проведено сравнение возможных вариантов организации движения внутри Олимпийского парка, рассмотрен вариант реализации многоурвневых пешеходных потоков. По результатам сравнения к реализации был предложен один из вариантов.

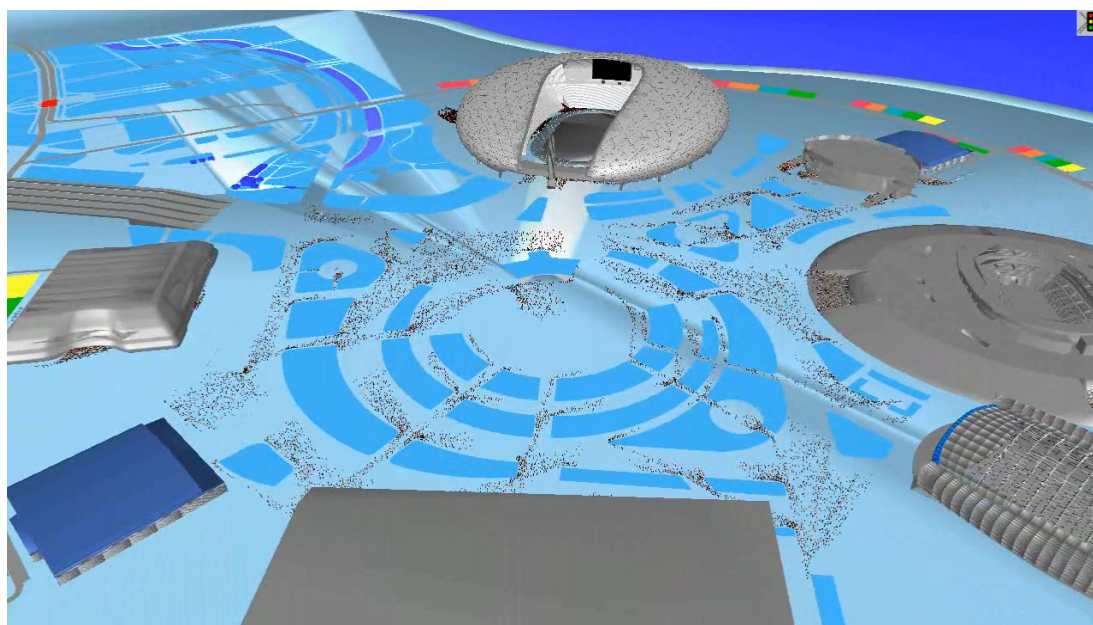


Рис. 7. Имитационная модель эвакуации людей в Олимпийском парке г. Сочи

Проект Имитационного моделирования Олимпийского парка г. Сочи стал первым крупным проектом в России, где использовалась модель социальных сил. За рубежом же она применялась, например, для моделирования объектов при организации Олимпийских игр в г. Пекине, для имитации эвакуации в одном из крупнейших отелей г. Рима, моделирования пешеходного движения на площади около Бранденбургских ворот и др.

Значимость этого опыта для Украины трудно переоценить. На чемпионат Евро-2012 ожидается больше двенадцати миллионов болельщиков из 206-ти стран мира. Так, в Киеве предполагается организовать потоки болельщиков не хаотично, а по специальным маршрутам. Предусмотрена схема движения транспорта от аэропорта «Борисполь» до стадиона «Олимпийский», а также

места парковки групп фанатов. А их будет немало. Только в Киеве ожидают около 30 тысяч. Для подготовки подобных мероприятий необходима тщательная подготовка для бесперебойного и, что самое главное, безопасного передвижения пешеходов, проработанная на базе имитационной модели.

Модель социальных сил является самой требовательной к машинным ресурсам, поэтому долгое время ей не уделялось должного внимания, но с ростом производительности ПК в последние годы стало возможно производить эксперименты с большим количеством пешеходов. И с каждым годом растет потенциал ее использования. В настоящее время, благодаря интеграции модели социальных сил в различные программные продукты, предназначенные для моделирования потоков, возможен анализ пешеходных потоков, который реально производить на достаточно высоком уровне. Так, с помощью данной методики были разработаны и проанализированы проекты стадионов как в ближнем и дальнем зарубежье, так и в России (Санкт-Петербург, Сочи). Это огромный опыт, который мы имеем возможность перенять и эффективно использовать.

Литература

1. Helbing, Social force model for pedestrian dynamics, Physical review E, May 1995.
2. Helbing, Simulation of Pedestrian Crowds in Normal and Evacuation Situations, Pedestrian and Evacuation Dynamics Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg; New York (2002) pp. 21-58.
3. M. APEL, K. T. WALDEER, Simulation of pedestrian Flows based on the Social Force Model Using the Verlet Link Cell Algorithm, Karl-Scharfenberg-Fakultät Salzburg, Institut für Simulation und Modellierung
4. Ramin Mehran, Alexis Oyama, Mubarak Shah, Abnormal Crowd Behavior Detection using Social Force Model, IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Miami, 2009
5. Was J., Gudowski B., Matuszyk PJ: Social Distances Model of Pedestrian Dynamics. In: El Yacoubi, Chopard B., Bandini S. (eds.) ACRI 2006 LNCS, vol.4173, pp.492-501. Springer, Heidelberg (2006)

Анотація

У статті приводяться принципи і методи моделювання пішохідних потоків. Описані існуючі моделі, дані приклади їх використання.

Annotation

Article is described principles and methods of pedestrian movement modelling. There is giving explanation and examples of their use.