

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша  
Российской академии наук

*На правах рукописи*

Плахов Андрей Григорьевич

**ВИРТУАЛЬНЫЙ ФУТБОЛ РОБОТОВ:  
АЛГОРИТМЫ ИГРОКОВ И СРЕДА МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.13.11 – математическое и программное  
обеспечение вычислительных машин,  
комплексов и компьютерных сетей

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва, 2008

Работа выполнена в Институте прикладной математики  
им. М.В.Келдыша Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук,  
профессор **Павловский В. Е.**

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
**Горбунов-Посадов М. М.**

доктор физико-математических наук,  
профессор **Зенкевич С. Л.**

**Ведущая организация:** Научно-исследовательский институт механики  
МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва

Защита состоится 24 июня 2008 года в 11 часов 00 минут на заседании  
диссертационного совета Д 002.024.01 при Институте прикладной математики  
им. М. В. Келдыша РАН по адресу: 125047, Москва, Миусская пл., д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной  
математики им. М. В. Келдыша РАН.

Автореферат разослан 23 мая 2008 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.024.01

доктор физико-математических наук



Полилова Т.А.

# 1 Общая характеристика работы

## **Актуальность темы**

Диссертационная работа посвящена разработке алгоритмов группового управления. На их основе и для их исследования и оптимизации созданы программы управления командой виртуальных роботов-футболистов.

В настоящее время задача группового управления роботами признается одной из центральных проблем мехатроники. На пути ее решения научным сообществом было сформулировано несколько модельных задач, среди которых одной из основных является роботизированный футбол. Конечная цель, поставленная в данной задаче, — к 2050 году создать команду человекоподобных роботов, которые смогут на равных играть в футбол по правилам ФИФА с командой-чемпионом мира среди людей. В настоящее время соревнования по роботизированному футболу проводятся во Франции, Кореи, Японии и многих других странах мира.

При этом, однако, возникает ряд существенных проблем. Роботы, принимающие участие в подобных соревнованиях, являются весьма сложными и дорогостоящими. Создание подобной команды связано с решением множества технических проблем, не имеющих прямого отношения к задаче группового управления.

В связи с вышеизложенным приобрела большую значимость разработка сред моделирования роботизированного футбола для проведения виртуальных соревнований. Участие в таких соревнованиях позволяет разработчикам программ управления роботами-футболистами сконцентрировать свои усилия на создании алгоритмов группового управления, избежав большого количества технических проблем.

Наличие подобной среды, созданной в рамках проекта «Виртуальный футбол» [1-11], позволило опробовать различные подходы к построению группового управления в условиях противодействия: детерминированный, переборный и эволюционный. Сформулированные алгоритмы, а также принципы управления и оптимизации, могут быть использованы в других задачах группового управления в условиях противодействия, в частности в антагонистических играх, характеризующихся большой глубиной дерева игры и наличием большого количества возможных полуходов в каждой игровой позиции.

**Целью работы** является создание алгоритмов группового управления, разработка на их основе и оптимизация программ управления роботами-футболистами, проведение соревнований этих программ в среде

моделирования, отбор наиболее эффективных алгоритмов на основе результатов, показанных в проведенных соревнованиях, обобщение этих алгоритмов для того, чтобы сделать возможным их использование в других задачах группового управления.

### ***Научная новизна***

В диссертации разработаны следующие алгоритмы группового управления: новые базовые алгоритмы передвижения роботов-футболистов, иерархические алгоритмы группового взаимодействия, алгоритмы оценки ситуации, вариант алгоритма Дейкстры, использующий для поиска в пространстве состояний управляемого объекта ограниченное сверху число операций на каждом шаге и не использующий операций динамического выделения и освобождения памяти, алгоритм построения многоуровневых карт пространства состояний. Даны оценки потребляемой памяти и быстродействия алгоритмов многоуровневого планирования в сравнении с другими алгоритмами поиска путей и планирования действий. Предложена принципиальная схема алгоритма планирования групповых действий в глубину. Сформулированы гибридные переборно-эволюционные принципы построения компонентных систем и методы их оптимизации, позволяющие производить автоматическое улучшение алгоритмов группового управления.

### ***Практическая значимость работы***

Значительная часть разработанных алгоритмов и методик может быть использована в широком классе задач управления, для которых дерево состояний управляемого объекта (или группы объектов) характеризуется большой глубиной и/или большим коэффициентом ветвления. При помощи созданных средств моделирования игры в рамках проекта «Виртуальный футбол» проведено более 20 турниров в 6 городах. В проекте принимает участие более 40 команд из 11 городов. За это время участниками отработано значительное количество различных алгоритмов управления и методик их создания. Команда «AVST» [6], в которой были применены излагаемые в диссертации алгоритмы и методы, 6 раз становилась чемпионом этих соревнований.

### ***Апробация работы и публикации***

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на:

- трех Международных конференциях "Интеллектуальные и многопроцессорные системы", Россия, Украина
- 4-й международной конференции CLAWAR-2001, Карлсруэ, Германия

- 12-й научно-технической конференции "Экстремальная робототехника - 2001"
- международной конференции "Искусственный интеллект - 2000"
- конференции "Мобильные роботы и мехатронные системы", МГУ, 2000
- международном конкурсе компьютерных программ студентов, аспирантов и молодых специалистов "Программист-2001"

Результаты работы изложены в 11 научных публикациях.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы. Содержание работы изложено на 157 страницах (включая приложение).

## **2 Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность темы работы, приведено краткое описание проекта «Виртуальный футбол», обзор других аналогичных международных соревнований, описаны правила игры и особенности, отличающие данную игру от футбола людей. Указаны цель работы и научная новизна.

**Первая глава** диссертации посвящена алгоритмам, не использующим переборные методы или эволюционные оптимизации (далее в работе они называются детерминированными). В ней изложены новые базовые алгоритмы, разработанные в рамках проекта «Виртуальный футбол», в частности, следующие блоки: перемещение в заданную точку, перехват движущегося мяча, удар по движущемуся мячу в определенном направлении, удар по мячу, отскакивающему от стенки игрового поля. Данные алгоритмы создавались при меньшем количестве упрощающих допущений, нежели в более ранних работах. Также в главе рассмотрен вопрос влияния статистической погрешности на оптимизацию детерминированных алгоритмов, и приведен обзор их достоинств и недостатков.

Наиболее характерным среди алгоритмов, рассматриваемых в первой главе, является алгоритм перехвата движущегося мяча. Основная сложность задачи перехвата мяча состоит в определении оптимальной точки встречи игрока с мячом, поскольку после этого задача перехвата сводится к более простой задаче передвижения в заданную точку. Описываемый алгоритм перехвата движущегося мяча основывается на приближенном вычислении точки встречи. Для этого допустимые угловая скорость и угловое ускорение игрока считаются бесконечно большими, что эквивалентно предположению о

том, что футболист уже развернут в направлении искомой точки упреждения и может двигаться к ней по прямой (рис. 1).

Положение робота в каждый момент времени задается четверкой чисел  $(x, y, V, \psi)$ , где  $(x, y)$  - координаты центра футболиста,  $V$  - его скорость, и  $\psi$  - курсовой угол. Мяч считается движущимся прямолинейно (т.е. не сталкивается с игроками и стенками игрового поля), с трением, за счет которого при движении мяча возникает постоянное ускорение, равное  $\vec{a} = -\varepsilon\vec{u}_0$ , где  $\vec{u}_0$  - единичный вектор, направленный по ходу движения мяча. Обозначим начальную скорость движения мяча  $u\vec{u}_0$ .

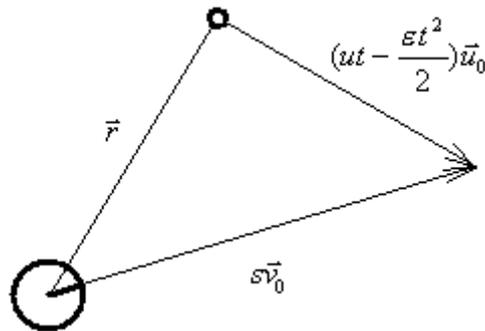


Рис.1. Перехват мяча с упреждением.

Будем считать, что начальная скорость движения футболиста равна  $v = v\vec{v}_0$ , где  $\vec{v}_0$  - единичный вектор, направленный по ходу движения, максимальную скорость движения обозначим  $v_{max} \geq v$ .

Возможны два случая: в первом за время достижения мяча скорость движения футболиста успевает достичь максимально допустимой (этот случай чаще встречается в реальных играх), во втором время приезда  $t$  оказывается меньше, нежели величина  $t_{acc} = \frac{v_{max}-v}{a_{max}}$ , где  $a_{max}$  - максимальное допустимое правилами ускорение футболиста.

За время  $t$  мяч пройдет расстояние, равное  $ut - \frac{\varepsilon t^2}{2}$ , футболист пройдет расстояние  $s$ , где

$$s = (t - t_{acc})v_{max} + \frac{t_{acc}(v_{max}+v)}{2} \quad \text{при } t > t_{acc}, \text{ и}$$

$$s = \frac{t^2 a_{max}}{2} + tv \quad \text{при } t < t_{acc}$$

Обозначив вектор, направленный от мяча к футболисту за  $\vec{r}$ , получаем следующую совокупность уравнений на время  $t$ :

$$\left( \frac{t^2 a_{max}}{2} + tv \right) \vec{v}_0 = \vec{r} + \left( ut - \frac{\varepsilon t^2}{2} \right) \vec{u}_0$$

$$\left( (t - t_{acc})v_{max} + \frac{t_{acc}(v_{max} + v)}{2} \right) \vec{v}_0 = \vec{r} + \left( ut - \frac{\varepsilon t^2}{2} \right) \vec{u}_0$$

Для того, чтобы найти искомое  $t$ , возведем в квадрат правую и левую часть каждого из них. При этом получаем два уравнения четвертой степени. Каждое из этих уравнений имеет от 0 до четырех решений, которые могут быть найдены аналитически согласно формулам Феррари.

При этом если у первого из них есть решение, для которого  $0 < t < \frac{v_{max}-v}{a_{max}}$ , то оно представляет собой искомое время достижения; если же такого решения не оказывается, то искомым временем достижения является минимальное из решений второго уравнения, превосходящее  $t_{acc} = \frac{v_{max}-v}{a_{max}}$ .

Возможна и ситуация, в которой соответствующих решений не находится ни у первого, ни у второго уравнения. Это означает, что в данных условиях футболист не сможет перехватить мяч, и его управление должно быть подчинено какой-либо другой цели, например, занимать некоторую ключевую позицию на поле.

В случае, когда решение существует, и получено значение времени упреждения  $t$ , вычисляется точка, в которой произойдет встреча. Для этого к текущему положению мяча прибавляется вектор  $\left(ut - \frac{\varepsilon t^2}{2}\right)\vec{u}_0$ . Соответственно, для перехвата мяча робот должен двигаться к этой точке с использованием алгоритма достижения точки, описываемого в начале главы. В условиях исходных упрощающих предположений (если футболист уже развернут в направлении точки упреждения), это, как и следует ожидать, соответствует простому прямолинейному движению с ускорением. Программное моделирование показывает, что применение данной тактики приводит к успешному перехвату движущегося мяча и в других случаях.

Хотя программа, играющая в виртуальный футбол роботов, и может быть создана только на основе детерминированных алгоритмов, описываемых в первой главе (и, более того, в конце главы описывается устройство подобной команды), подобный подход не лишен недостатков. Так, большая часть детерминированных алгоритмов, подобно рассмотренному выше, строится в условиях некоторых упрощающих предположений. Наиболее частыми среди них является предположение отсутствия столкновений с роботами соперника и роботами своей команды при следовании по найденной траектории, и игнорирование либо упрощенное рассмотрение случаев, в которых часть найденной траектории передвижения робота выходит за границы игрового поля, то есть следование ей приводит к столкновению со стенкой. Это приводит к снижению качества игры в тех ситуациях, когда данные предположения не выполняются.

Кроме того, стратегический уровень игры подобных детерминированных программ создается, исходя из различных эмпирических соображений. Наконец, подобные алгоритмы и их оптимизации могут быть использованы только в частной задаче управления роботами-футболистами в условиях строго определенной физической модели и при фиксированных игровых правилах. Как следствие, полученные при их разработке результаты плохо обобщаются на другие применения и имеют ограниченную ценность.

По вышеизложенным причинам представляет интерес создание алгоритмов, основанных на более универсальных принципах, таких как поиск последовательности действий на графе состояний управляемого объекта, и эволюционные оптимизации.

Во **второй главе** описаны алгоритмы, основанные на планировании передвижений и других действий (поведения) групп мобильных роботов-футболистов при помощи поиска на графе состояний управляемого футболиста или всей команды. Рассмотрены оптимизации поиска на графе состояний группы, многоуровневые модели поведения, принятие решений методом обратной иерархии управления. Описывается алгоритм игры команды AVST, неоднократного чемпиона соревнований по виртуальному футболу роботов.

Для того, чтобы представить задачу виртуального футбола как задачу поиска пути в дискретном пространстве состояний, следует ввести дискретизацию для возможных положений футболистов, и ввести квантизацию времени, разбив его на последовательные такты. Чтобы получаемая в ходе поиска последовательность действий оказывалась эффективной, шаг этой дискретизации (как временной, так и пространственной и угловой) должен быть достаточно малым. В этом случае длина искомой последовательности действий оказывается велика (игровая ситуация сколько-нибудь значительно меняется только за время порядка сотен тактов), а пространство состояний управляемого объекта (команды футболистов) имеет большой коэффициент ветвления (порядка 30 для одного футболиста и порядка  $2 \cdot 10^7$  для команды из 5 игроков). По этой причине как прямое применение алгоритмов, широко используемых в неантагонистических задачах (таких как  $A^*$  или  $D^*$ ), так и минимаксный перебор дерева позиций (часто используемый в антагонистических играх), приводят к огромным вычислительным затратам, исключающим на современном оборудовании возможность построения управления в реальном времени.

В диссертации рассматриваются различные методы планирования действий, создававшиеся с учетом этой особенности, в частности, иерархические методы поиска путей, и метод просчета стратегий в глубину.

Вкратце изложим предложенную в работе иерархическую реализацию

поиска пути для одного футболиста. Целью данного поиска является построение управления одним роботом, за минимальное время переводящего его из начальной позиции в целевую. В отличие от изложенных в первой главе детерминированных алгоритмов перемещения, в данном случае управление строится не аналитически, но в ходе определенной переборной процедуры. Это, в частности, дает возможность корректно учитывать наличие стенок игрового поля, штанг, возможных столкновений с другими футболистами.

Вначале создается высокоуровневое представление пространства состояний робота-футболиста. Оно представляет собой направленный граф, вершины которого соответствуют некоторому разбиению множества возможных позиций робота-футболиста на непересекающиеся подмножества-кластеры, каждое из которых состоит из близких позиций. Эта задача выполняется предложенным в работе «алгоритмом раскраски в три прохода». Данная процедура выполняется только один раз, это происходит до начала собственно игры.

Поиск пути состоит из двух этапов. На первом при помощи известного алгоритма  $A^*$  ищется путь на высокоуровневом представлении пространства состояний. На втором при помощи описанной в работе модификации алгоритма Дейкстры, использующей фиксированную память, ведется непосредственный поиск требуемого пути. При этом высокоуровневое представление обладает следующим свойством: если путь с учетом имеющихся ограничений на нем не найден, то его не существует и в исходном пространстве позиций. Если же путь, представляющий собой последовательность соседних кластеров позиций, найден, то в пространстве позиций футболиста путь достаточно искать только по позициям, которые находятся в этих кластерах или в их ближайших соседях. Асимптотические оценки вычислительной сложности такого поиска показывают преимущество данного подхода над неиерархическим. Применение иерархического метода поиска пути в программе, играющей в виртуальных футбол, подтверждает эти оценки.

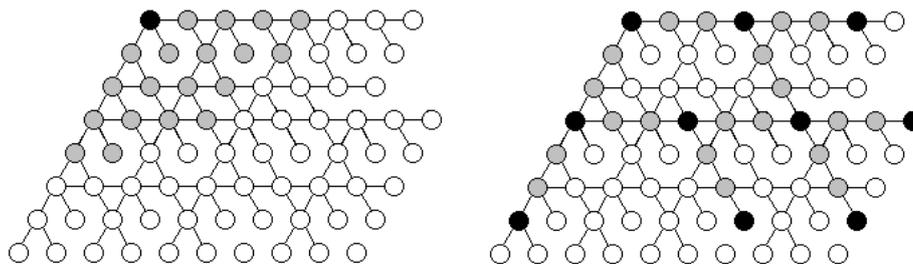
Данный алгоритм успешно справляется с задачей тактического управления одним футболистом, однако неприменим для управления командой (то есть группового). Для решения этой задачи предлагается метод просчета стратегий в глубину. Его применение предполагает, что имеется некоторый набор стратегий управления  $S$ , каждая из которых является оптимальной в части возможных начальных ситуаций (например, построена в условии дополнительных ограничений или упрощающих предположений). В качестве такого набора могут служить, например, простые беспереборные алгоритмы управления; также он может быть создан на основе экспертного опыта решения аналогичных задач человеком. Для задачи управления командой роботов-

футболистов такой набор строится на основе детерминированных алгоритмов, о которых идет речь в первой главе диссертационной работы.

Метод просчета в глубину заключается в том, что вместо задачи планирования в исходном пространстве состояний команды, рассматривается поиск на направленном графе состояний, рекурсивно определенном следующим образом. В этот граф входит начальное состояние команды. Для каждого вошедшего в граф состояния  $A$  строится набор состояний, соответствующих применению каждой стратегии из набора  $S$  в начальном состоянии  $A$  в течение некоторого числа  $s$  шагов (это число может быть как фиксированным, так и выбираться в зависимости от состояния  $A$  и используемой стратегии). Полученные таким образом вершины также включаются в граф, и процедура повторяется рекурсивно вплоть до достижения определенной глубины. Далее среди терминальных для данной процедуры вершин находится та, которая обеспечивает наилучшую оценку, и в качестве искомой последовательности действий принимается последовательность, ведущая к этому состоянию. Отметим, что использование метода просчета в глубину не требует строить описанный граф в явном виде или хранить его в памяти.

В том случае, когда число  $s$  оказывается больше длины оптимального пути, просчет в глубину вырождается в простой перебор стратегий из набора  $S$ . Путь (составная стратегия), полученный при помощи просчета в глубину, может быть найден существенно быстрее, нежели при помощи известных алгоритмов поиска, в том числе и информированного (таких, как  $A^*$ ). Варьируя число  $s$  и набор стратегий  $S$ , можно управлять балансом между точностью найденного решения (т.е. его отличием от оптимального) и вычислительной сложностью поиска.

Сравним процедуру поиска по алгоритму Дейкстры с вышеизложенной процедурой стратегического поиска в глубину. На рис. 2 слева проиллюстрировано промежуточное состояние в ходе поиска при помощи алгоритма Дейкстры; черным цветом изображена начальная вершина, серым – обработанные на изображаемый момент. Справа иллюстрируется промежуточное состояние поиска в этом же пространстве состояний путем просчета в глубину с набором  $S$ , состоящим из двух стратегий: «идти вправо» и «идти влево по диагонали», применяемым на протяжении фиксированного числа  $s=3$  шагов. Черным цветом изображены вершины укрупненного графа, серым – промежуточные шаги.



*Рис. 2. Сравнение двух методов поиска последовательности действий.*

Интересной особенностью процедуры стратегического поиска в глубину является то, что она позволяет прозрачным образом сочетать в одной программе гетерогенные (то есть создававшиеся по разным принципам) стратегии (в том числе и изначально не задумывавшиеся для использования с этой целью), с сохранением сильных сторон каждой из них.

**Третья глава** посвящена использованию принципов эволюционной оптимизации в контексте проекта «Виртуальный футбол», интерпретации полученных экспериментальных результатов, и созданию гибридных схем алгоритмов. Основная идея эволюционной оптимизации заключается в том, чтобы сложить с плеч разработчиков работу по подбору подмножества используемых в той или иной ситуации базовых алгоритмов управления, их настроек, а также других произвольно выбираемых параметров алгоритма. Такая работа выполняется автоматически, при помощи множества итераций, каждая из которых состоит в измерении качества одного или нескольких рассматриваемых наборов параметров (поколения), их эволюционного изменения в направлении, задаваемом результатами этих измерений (также в процесс изменения часто вводится случайная компонента, чтобы избежать остановки эволюции при достижении локального максимума эффективности), и формирования на этой основе нового поколения. Строго говоря, любой метод эволюционной оптимизации не является непосредственной частью алгоритма игры, а представляет собой лишь часть процесса его разработки.

Для того чтобы тот или иной метод автоматической оптимизации был применимым на практике, нужно, чтобы вручную нельзя было произвести подбор лучших значений параметров за значительно меньшее время. Обобщая это наблюдение, предложим следующую меру эффективности различных методов автоматической оптимизации. Произвольным образом выберем референсную команду  $X$ . Измерим время  $t$ , необходимое для появления команды, не проигрывающей команде  $X$  (при использовании выбранного метода в полностью автоматическом режиме на некотором фиксированном

оборудовании). Для сравнения различных методов оптимизации в диссертационной работе используется понятие «времени достижения эффективности», которое представляет собой значение  $t$ , усредненное для нескольких экспериментальных запусков. Предлагается четыре принципа снижения этого показателя: минимизация времени одного измерения, раннее отбрасывание неконсистентных наборов параметров, учет внутренней симметрии задачи, и учет априорного влияния параметра на результат. Из них наиболее действенным оказывается минимизация времени одного измерения.

Для иллюстрации важности этого принципа рассмотрим вопрос об определении необходимой длительности тестовой игры, если в качестве критерия оптимизации используется только счет игры (число забитых голов). Будем считать, что промежутки игры между двумя последовательными голами независимы, и что гол на каждом таком промежутке забивается правой и левой командами с вероятностью соответственно  $p$  и  $q$ , где  $p + q = 1$ , причем эти вероятности нам заранее неизвестны, и мы хотим найти их приближенное значение в ходе тестовой игры. Рассмотрим величины  $a_i$ ,  $i = 1..N$ , где  $a_i = 1$ , если гол на  $N$ -том промежутке забит правой командой, и  $a_i = -1$ , если гол забит левой. Обозначим общий счет игры  $A:B$ , где  $A$  – число голов, забитых правой,  $B$  – левой командой. Согласно закону больших чисел,

$$p = \frac{1 + p - q}{2} = \frac{1}{2} + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{A - B}{2(A + B)} = \frac{1}{2} + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1..N} a_i}{2N}$$

Для вычисления приближенного значения  $p$  следует использовать это равенство со снятым  $\lim_{N \rightarrow \infty}$  (то есть при фиксированном  $N$ ). Найдем дисперсию этой величины. Имеем:

$$\begin{aligned} D\left(\frac{1}{2} + \frac{\sum_{i=1..N} a_i}{2N}\right) &= \frac{\sum_{i=1..N} D(a_i)}{4N^2} = \frac{D(a_0)}{4N} = \frac{p(1-p+q)^2 + q(-1-p+q)^2}{4N} \\ &= \frac{pq^2 + qp^2}{N} = \frac{pq}{N} \end{aligned}$$

Таким образом, среднеквадратичное отклонение при заданном  $N$  составляет  $\sigma = \sqrt{\frac{pq}{N}} \leq \frac{1}{2\sqrt{N}}$ , причем максимум, как и следовало ожидать, достигается при  $p = q = \frac{1}{2}$ . Отсюда следует, что, если следовать правилу трех сигм, то для определения  $p$  с точностью до  $\pm \varepsilon$  следует вести тестовую игру вплоть до достижения суммарного счета как минимум  $N = A + B = \frac{9}{4\varepsilon^2}$ . Как правило, при небольшой подстройке алгоритма  $p$  отличается от  $\frac{1}{2}$  на величины

порядка 0.05, то есть для определения того, какая же из двух команд – исходная или модифицированная – сильнее, требуется вести игру до значений порядка тысячи суммарно забитых голов.

Для того, чтобы избежать необходимости подобных сверхдлинных игровых сессий, в диссертационной работе предлагается подход, в котором эволюционной подстройке подвергаются отдельные подсистемы программы, что позволяет ввести иные критерии оценки качества, нежели суммарный счет игры, и таким образом резко сократить время одного измерения. Подобные критерии вводятся для блока вычисления численной оценки ситуации (используемого в переборных алгоритмах планирования), для блока предсказания развития ситуации при применении заданной стратегии (используемого в процедуре перебора стратегий в глубину), для блока фильтрации перебираемых вариантов в схеме обратной иерархии управления.

Алгоритмы, созданные по принципам эволюционной оптимизации, сравниваются с приведенной в предыдущей главе схемой алгоритмов обратной иерархии управления. Оба класса обладают как преимуществами, так и недостатками, которые взаимно дополняют друг друга. Так, для первых сильной стороной является стратегический уровень игры, а для вторых – тактический; эффективность первых может быть повышена экстенсивным использованием машинного времени на этапе разработки, а вторых – экстенсивным использованием машинного времени в ходе реальной игры. Поэтому интерес представляют гибридные подходы.

Глава завершается итоговым описанием класса алгоритмов, использующих как обратную иерархию управления, так и эволюционную оптимизацию отдельных подсистем.

**В заключении** подведены итоги работы и сформулированы ее основные результаты.

**В приложении** приведено описание архитектурных и программных решений, принятых при разработке проекта «Виртуальный футбол». Перечислены исходные требования к программному обеспечению проекта, собранные в начале разработки, и приведено обоснование соответствующих им решений. Описан протокол взаимодействия программ, управляющих игрой соревнующихся команд, с серверной программой, занимающейся физическим моделированием игры, подсчетом забитых голов, автоматическим судейством игры.

### 3 Основные результаты

- Созданы алгоритмы группового принятия решений, применимые как в задаче управления роботами-футболистами, так и в других задачах группового управления.
- Разработаны новые базовые алгоритмы, используемые для игры роботов-футболистов, включая алгоритмы передвижения, алгоритмы группового взаимодействия, и алгоритмы оценки ситуации.
- Разработана схема многоуровневого принятия решений. В качестве ее составляющих разработаны алгоритм построения последовательности карт пространства ситуации, и вариант алгоритма Дейкстры поиска на графах, использующий на каждом шаге число операций, ограниченное сверху фиксированной константой, и не использующий операций динамической работы с памятью. Даны оценки потребляемой памяти и быстродействия многоуровневых алгоритмов принятия решений в сравнении с другими алгоритмами информированного и неинформированного поиска.
- Предложена принципиальная схема алгоритма планирования групповых действий путем перебора стратегий в глубину. Данная схема позволяет использовать гетерогенный набор стратегий для построения систем, сочетающих в себе сильные стороны каждой из них. На ее основе создана программа управления виртуальными роботами-футболистами AVST, использующая в своей работе обратную иерархию управления.
- Введены гибридные схемы группового управления, сочетающие в себе элементы эволюционной оптимизации, переборные методы и обратную иерархию управления. Проведены эксперименты по автоматической оптимизации разработанных алгоритмов, подтвердившие эффективность этих схем.

#### Список публикаций по теме диссертации

1. Д.Е.Охоцимский, В.Е. Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов. Система моделирования игры роботов-футболистов. // Тр. Конференции "Мобильные роботы и мехатронные системы", МГУ, 5-6 декабря 2000 - Под ред. д.ф.-м.н. А.М.Формальского и к.ф.-м.н. В.М.Буданова. М.: Издательство МГУ, 2001, с.192 - 203.
2. Д.Е.Охоцимский, В.Е. Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов. Моделирование игры роботов-футболистов и базовые алгоритмы управления ими. // Искусственный интеллект, N 3, 2000, с. 534-540.

3. Д.Е.Охоцимский, В.Е.Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов. Моделирование игры роботов-футболистов и базовые алгоритмы управления ими. Тр. (тезисы докладов) Международной конференции "Искусственный интеллект - 2000", Кацивели, Крым, 11-16 сентября 2000 г., с.123-125. (3 стр.).
4. Д.Е.Охоцимский, В.Е. Павловский, А.К.Платонов, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов. Моделирование алгоритмов управления игрой роботов-футболистов. Тр. 12 научно-технической конференции "Экстремальная робототехника - 2001", С.-Петербург, 2001
5. Д.Е.Охоцимский, В.Е. Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов. Моделирование игры роботов-футболистов в пакете "Виртуальный футбол". Тр. Международной конференции "Интеллектуальные и многопроцессорные системы" (ИМС-2001), Дивноморское, Россия, 1-6 октября 2001, с.167-170 (4 стр.). Тр. научной школы "Интеллектуальные робототехнические системы" (ИРС-2001), Дивноморское, Россия, 1-6 октября 2001, с.165-167 (3 стр.).
6. Д.Е.Охоцимский, В.Е. Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов, В.В.Павловский. Моделирование игры роботов-футболистов в пакете "Виртуальный футбол". // Мехатроника, 2002, №1, с.2-5.
7. Д.Е.Охоцимский, В.Е.Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов, В.В.Павловский. Виртуальный футбол: алгоритмы и моделирование игры роботов-футболистов. // Сб. "Новые методы управления сложными системами", - М.:Наука, 2004, с.289
8. В.Е.Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов, В.В.Павловский. Проект "Виртуальный футбол": расширение серверов и программ-игроков. // Искусственный интеллект, 2003, №4, с. 153-157.
9. В.Е.Павловский, А.Г.Плахов, А.Н.Туганов, В.В.Павловский. Программный пакет "Виртуальный футбол". Тр. Международного конкурса компьютерных программ студентов, аспирантов и молодых специалистов "Программист-2001". Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, с.47-49. (3 стр.).
10. D.E.Okhotsimsky, V.E.Pavlovsky, A.G.Plakhov, A.N.Touganov. Towards the CLAWAR robots soccer playing - simulation of robotic soccer. Proc. of 4-th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots CLAWAR'2001. Karlsruhe, Germany, 24-26 September 2001, pp.451-456. (6 pages).
11. D.E.Okhotsimsky, V.E.Pavlovsky, A.G.Plakhov, A.N.Touganov, V.V.Pavlovsky, S.S.Stepanov, A.Yu.Zaslavsky. Robosoccer-RU Open Simulation League: Principles and Algorithms. // Proc. RoboCup 2002: Robot Soccer World Cup VI Intl. Symposium, pp, 271-278, Springer 2003