

基于全局视觉反馈和运动轨迹约束的 多智能体比赛数据分析系统

刘宏 查红彬 林飞

北京大学视觉与听觉信息处理国家重点实验室

地址：北京大学信息科学技术学院智能科学系 100871

{ liuhong, zha, linfei } @cis.pku.edu.cn

摘要：本文给出了一个面向足球机器人的多智能体比赛数据分析系统。该系统通过全局视觉反馈，实时获取赛场上多个快速运动的足球机器人的位置和姿态作为原始比赛数据。由于各种噪声的干扰、实时性要求等因素对视觉处理造成的局限，使得原始比赛数据中存在很多“无效数据”，即通过图形显示回放的机器人运动状况与实际的比赛过程存在明显的差距。本文在提高全局视觉系统处理能力基础上，通过机器人运动轨迹的三个约束条件快速地判别无效数据并给出了针对无效数据的轨迹插补方法，通过图形显示的动态仿真建立了比赛数据分析系统。最后，探讨了以该系统为基础可以进一步研究开发的四项新功能。

关键词：多智能体、全局视觉、运动轨迹约束、比赛数据分析

1. 引言

足球机器人是近年来发展起来的机器人研究和竞赛项目，涉及在限定环境下敌我双方多个智能体的协调与对抗技术^[1]。RoboCup 和 FIRA 等国际组织每年都举办国际性和区域性比赛，已经吸引了世界各地几百所大学的参加^[2,3]。足球机器人系统一般划分为硬件系统、感知系统、策略系统和通讯系统等子系统，在具备同等硬件水平和通讯能力的情况下，感知能力和规划能力将成为机器人足球竞赛的关键。足球机器人系统的感知与规划具有高度融合的特点，规划过程和策略执行对感知能力具有非常高的依赖性。

与一般的运动规划问题相比，足球机器人规划问题的复杂性还在于：多个智能体的高速运动、运动速度与方向的复杂变化、复杂的碰撞行为和高度实时性要求。很多传统的规划方法是针对一个静态的封闭环境设计的，具有较高的时间复杂度，如传统的位姿空间描述和图搜索的求解方法等，很难满足实时性能的要求。探索适合于足球机器人在动态环境下的多智能体规划方法，已经引起研究人员的关注^[4,5]。我们通过对碰撞行为的分析，建立了碰撞预测模型，体现了以碰撞为中心的足球机器人规划思想^[6]，而这些规划行为的设计都依赖于感知系统的实时反馈。

为了在一个非常简便的环境下试验足球机器人算法，提供交流平台，RoboCup 和 FIRA 都开发自己的仿真比赛平台。尽管仿真平台设计的功能越来越靠近实际比赛，但实际比赛所面临的复杂情况仍然是仿真比赛所无法比拟的。但物理比赛平台的在线分析和赛后分析等方面也存在很大的局限，目前采用的主要方法是利用数字摄像机拍摄物理比赛的录像，供比研究人员赛后分析，相当于反复观看比赛录像，但大多停留在定性的主观分析阶段，难以对整场比赛进行精确、定量的统计分析，给出客观的评价——这些对竞赛水平的提高和多智能体算法的改进是非常重要的。本文针对这一问题，以 MiroSot 3 对 3 足球机器人硬件比赛平台为例，给出了一个面向足球机器人的多智能体比赛分析系统。该系统通过全局视觉实时获取赛场上多个快速运动的足球机器人的位置和姿态，通过图形仿真支持赛后回放、统计和分析。

2. 实时全局视觉反馈

作为足球机器人的主要感知手段,视觉系统的性能好坏对机器人性能的发挥起决定性作用,视觉系统可以解决足球机器人的自定位、目标发现、跟踪与定位等问题^[7,8]。自定位是指机器人通过视觉系统确定自身在场地上的位置和方向;而目标发现、跟踪与定位是指机器人通过视觉系统发现、跟踪其他机器人和球,并识别其位置和状态。足球机器人视觉系统与一般的机器视觉系统相比,有很强的特殊性,这主要体现在两个方面:视觉环境的复杂性和系统反应的高度实时性要求。影响视觉系统性能的复杂环境因素包括:照明强度的变化、不均匀的照明、光线发射率的不同、阴影的干扰、物体间的遮挡、场景的变化、运动的目标、对抗的局面和场地周围观众的影响等等。足球机器人快速的运动和激烈的对抗,要求在几十毫秒内完成视觉信息处理、通讯、动作规划等一系列任务,以形成下一周期的比赛策略,这对视觉系统的实时性提出了很高的要求,一些时间复杂度高的算法很难直接使用。目前采用的主要方法是充分利用场地和机器人的颜色和几何特征^[9],例如基于颜色标记的视觉信息处理方法,就是通过对不同的机器人、球和场地区域赋予不同颜色的服装来支持目标的定位和识别。本文介绍的 MiroSot 3:3 比赛平台采用的是全局视觉系统,该视觉系统固定在场地上方,通过单幅图象就可以获取整个场地的比赛信息,与局部的主动视觉相比较,具有一定的优势。但是,由于 MiroSot 3:3 比赛过程中机器人运动速度快,服装颜色标记系统比较复杂,场地不同位置照明可能发生较大的变化等复杂因素,实现实时、准确的视觉反馈还是存在相当难度的。图 1、图 2 给出了同一颜色、同一服装在场地不同位置的变化。



图 1 同一标志在场地不同位置的色彩效果 图 2 同一服装在场地不同位置的色彩效果

处理照明条件变化造成的颜色特征参数偏移的一个重要方法是颜色空间变换,即将 RGB 空间变换到 YUV、HSV 等颜色空间,使提取的特征对光线变化更加稳定^[10]。但这种变换更适合处理比赛场地照明条件的整体变化。各种因素造成的比赛场地上的局部照明变化、反射性能的不同、阴影的干扰等,仅仅通过上述颜色空间变换处理是不够的。实际比赛过程也表明:在很多情况下,目标识别性能的好坏与机器人在场地所处的位置有很大的依赖关系。这就要求建立与场地位置相关的颜色特征,支持不同位置的机器人检测、跟踪和识别。我们提出了针对比赛和训练两个环节分别设计比赛服装和训练服装的方案^[11,12],比赛服装采用多色模式,用于表示队伍的颜色、队员的颜色;而训练服装采用单色模式,在比赛服装中出现的所有颜色,都有一个单色训练服装与之对应。赛前通过对单色训练服装的适应性学习提高识别性能。实验表明,这种处理方法可以很好地解决场地不同区域的照明变化问题。

在保证视觉系统实时性和精确性方面,我们主要采用了以下几个方面的策略:

(1) 通过比赛服装设计模式的改进达到提高视觉系统性能的目的:实验结果表明,采用对角线队服模式比采用四方块队服模式具有更好的识别性能。

(2) 运动方向和区域的预测:根据足球机器人在比赛中的运动特点,快速估计当前机器人后几个周期最可能处于的位置和姿态,为目标搜索提供依据。

(3) 局部搜索和全局搜索相结合:如果基于运动方向和区域预测的局部搜索失败,那么,将搜索范围扩大到整个场地,保证丢失的运动目标能够被快速找回。

(4) 视觉信息处理的选择性:理论上讲,在每个周期内,每个运动目标都需要检测、跟踪、识别和定位,但精确处理这些信息是需要大量计算的,在不少情况下,难以适应实时

系统的要求。因此，我们在判断每个运动物体运动稳定性的基础上，在不同的周期内有选择地精确识别和定位不同运动目标，相当于多个目标分时地共享一个视觉处理系统。这样，既保证了视觉系统的可靠性，又大幅度地提高了系统的实时性能。

这里将通过全局视觉系统获得的各运动目标的位置和姿态数据称为基于全局视觉的比赛轨迹数据（Global Vision based Competition Trajectory，简称为GVCT数据），理论上讲，只要采样的时间间隔达到系统的要求，数据的精度足够高，GVCT数据就可以唯一地确定一场比赛的全过程。i时刻的GVCT数据格式表示如下：

GVCT_i= (FBⁱ, FHⁱ, FOⁱ) 球的位置 FBⁱ= (B_xⁱ, B_yⁱ)

本方队员位置和姿态：FHⁱ= (H_{1x}ⁱ, H_{1y}ⁱ, H_{1θ}ⁱ, H_{2x}ⁱ, H_{2y}ⁱ, H_{2θ}ⁱ, H_{3x}ⁱ, H_{3y}ⁱ, H_{3θ}ⁱ)

对方队员位置：FOⁱ= (O_{1x}ⁱ, O_{1y}ⁱ, O_{2x}ⁱ, O_{2y}ⁱ, O_{3x}ⁱ, O_{3y}ⁱ)

3. 机器人运动轨迹约束

由于视觉系统的复杂性和处理能力的局限，在比赛过程中通过视觉反馈获得的GVCT数据中往往存在着不少无效的数据，即与实际比赛情况相比，存在较大误差的数据。一般表现为个别位置数据或角度数据突然明显偏离运动轨迹正常曲线范围，当然也存在位置和角度识别失败的情况。表1和表2分别给出了两段时间内无效位置和无效角度数据出现的情况。

表1 在2403T~2407T的比赛数据中包含对方机器人位置识别失败的情况

i	B _x ⁱ	B _y ⁱ	H _{1x} ⁱ	H _{1y} ⁱ	H _{1θ} ⁱ	H _{2x} ⁱ	H _{2y} ⁱ	H _{2θ} ⁱ	H _{3x} ⁱ	H _{3y} ⁱ	H _{3θ} ⁱ	O _{1x} ⁱ	O _{1y} ⁱ	O _{2x} ⁱ	O _{2y} ⁱ	O _{3x} ⁱ
i=2403T	139	40	110	75	187	130	14	237	5	56	261	131	103	145	42	145
i=2404T	139	40	110	76	180	131	14	234	5	55	272	132	103	144	43	144
i=2405T	138	40	110	76	186	130	14	240	5	55	267	-1	-1	144	42	144
i=2406T	138	40	110	75	192	130	14	235	5	56	272	132	103	144	43	144
i=2407T	139	40	111	75	194	129	14	254	5	56	267	132	102	144	42	144

针对表1，为说明问题方便，这里设k=2403T，表中O_{1x}^{k+2}、O_{1y}^{k+2}两项的取值为-1表示对方1号机器人位置识别失败。如果数据不做处理，则对方的1号机器人在图形仿真的比赛回放中会突然跳跃到场地的一角，形成位置的突变，表现为运动的不连续性。

表2 在2663T~2670T的比赛数据中包含本方机器人姿态角度识别错误的情况

i	B _x ⁱ	B _y ⁱ	H _{1x} ⁱ	H _{1y} ⁱ	H _{1θ} ⁱ	H _{2x} ⁱ	H _{2y} ⁱ	H _{2θ} ⁱ	H _{3x} ⁱ	H _{3y} ⁱ	H _{3θ} ⁱ	O _{1x} ⁱ	O _{1y} ⁱ	O _{2x} ⁱ	O _{2y} ⁱ
i=2663T	131	108	108	116	182	92	66	192	3	69	285	-1	-1	143	16
i=2664T	131	109	109	117	184	93	66	178	3	69	288	-1	-1	143	17
i=2665T	132	108	115	116	59	93	66	183	3	68	281	117	114	143	16
i=2666T	132	108	116	116	58	93	66	185	3	69	284	117	114	143	17
i=2667T	133	108	110	116	182	94	66	177	3	68	276	118	112	144	16
i=2668T	133	109,	116	115	46	94	67	182	3	68	278	118	112	143	16
i=2669T	134	108	110	116	180	94	66	179	3	68	274	118	111	143	16
i=2670T	134	108	111	116	184	95	67	177	3	68	276	118	111	143	17

针对表2，为说明问题方便，这里设k=2663T，表中O_{1x}^k、O_{1y}^k、O_{1x}^{k+1}、O_{1y}^{k+1}、O_{3x}^{k+3}、O_{3y}^{k+3}等项的取值为-1与表1中的情况类似，表示对方1号、3号机器人在K、K+1和K+3时刻位置识别失败。表2中的H_{1θ}^{k+3}、H_{1θ}^{k+4}、H_{1θ}^{k+6}三项的取值则是本方机器人姿态识别的错误结果。

在比赛数据的处理中，设 X_i , Y_i 表示某一对象（本方机器人、对方机器人或球）的位置， β_i 表示某一对象（本方机器人或对方机器人）的姿态角； X_{\max} , Y_{\max} , β_{\max} 为单位时间 T 内某一对象线速度和角速度的极限值。为了从在线记录的 GVCT 数据中快速判断无效数据，我们设计了以下三个轨迹约束的条件：

1) 线速度约束

设：某对象 i 时刻的位置数据已经确认为有效数据

若： $|X_{i+1}-X_i|/T > X_{\max}$ 或 $|Y_{i+1}-Y_i|/T > Y_{\max}$

则：判定该对象 $i+1$ 时刻的位置数据为无效数据。

2) 角速度约束

设：某对象 i 时刻的姿态角度数据已经确认为有效数据

若： $|\beta_{i+1}-\beta_i|/T > \beta_{\max}$

则：判定该对象 $i+1$ 时刻的姿态角度数据为无效数据。

3) 轨迹平滑性约束

设：某对象 i 时刻的位置数据和姿态角度数据已经确认为有效数据

若： $|X_{i+2}-X_i|/T < m_x \times X_{\max}$, $(|X_{i+1}-X_i| + |X_{i+2}-X_{i+1}|)/T > M_x \times X_{\max}$

或 $|Y_{i+2}-Y_i|/T < m_y \times Y_{\max}$, $(|Y_{i+1}-Y_i| + |Y_{i+2}-Y_{i+1}|)/T > M_y \times Y_{\max}$

或 $|\beta_{i+2}-\beta_i|/T < m_\beta \times \beta_{\max}$, $(|\beta_{i+1}-\beta_i| + |\beta_{i+2}-\beta_{i+1}|)/T > M_\beta \times \beta_{\max}$

则：判定该对象 $i+1$ 时刻的姿态角度数据为无效数据。这里， M_x , m_x , M_y , m_y , M_β , m_β 在 $(0, 0.5)$ 的范围内，根据实际比赛平台确定。

上述三个约束条件发现的无效数据处理方法为：根据线速度约束和角速度约束在连续 N 个周期内判断有效的数据，通过线性插值在有效数据之间合理地插入数据，替代无效数据，保证轨迹的平滑性。

4. 比赛数据分析系统

下面通过图 3 给出比赛数据分析系统（Competition Data Analysis, 简称 CDA 系统）。

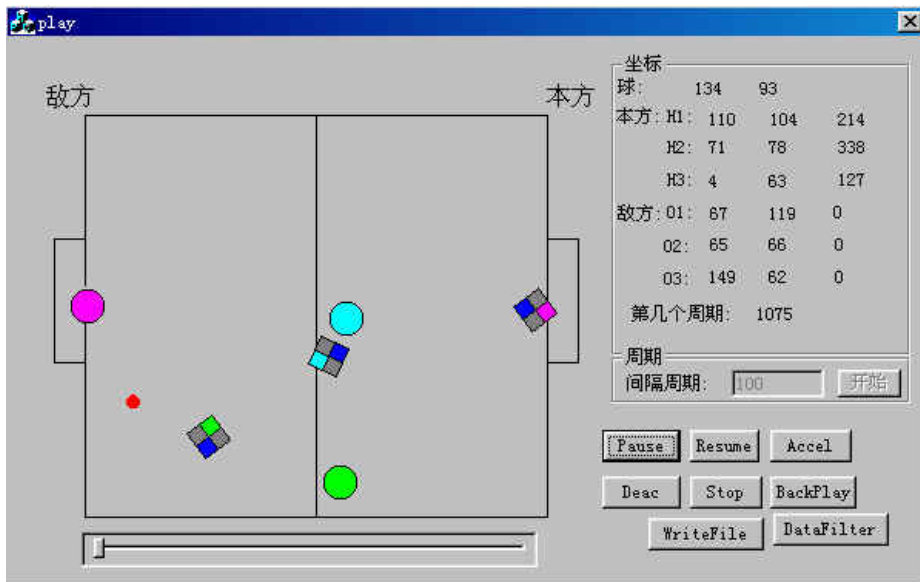


图 3 CDA 系统的图形界面

图形界面可以分为五个基本功能区域：左部为图形仿真区域：根据 FIRA MiroSot 3:3 的物理平台尺寸设计，本方机器人采用完整的彩色队服表示，而对方机器人通过彩色的圆表示其位置；左下部为比赛数据图形回放进展条：可以通过鼠标选择任意位置的比赛；右上部为

比赛数据显示区，即 GVCT 数据，这里还包括运动仿真的时间间隔，支持慢速的动作播放；右下部为数据分析和比赛回放的控制区：包括开始、停止、加速、减速、暂停、文件处理等；最后，右下角处有一个数据过滤按钮，执行的功能就是无效数据的分析和处理。可见，系统的基本功能所提供的是比赛轨迹的在线记录、数据分析和比赛回放功能。

基本系统的性能评价包括准确性、数据量和实时性等几个主要方面。首先是准确性问题：由于基本系统所回放的数据存在无效数据，系统对无效数据又进行了处理，因此，系统的回放性能需要一个客观的评价标准来衡量。通过时间上的对应关系，对同一时刻 DV 获取的比赛场面和 CDA 系统显示结果可以进行一对一的比较，这是一种有效的评价方法。在处理的比赛数据量方面，由于系统处理的不是原始的图象信息，也不是中间的特征信息，而是在位置姿态识别基础上唯一决定运动对象的位姿数据，因此描述整场比赛的数据量已经压缩到了极限，如果识别是足够精确的，那么这种“压缩”也是“无损”的，既完全可以恢复整场比赛的所有细节。通过实验发现，FIRA Mirosot 3:3 比赛中上下半场共 10 分钟一般只需要 2~3M 的数据量，在数据获取过程中不会对内存造成明显的负担。GVCT 数据中本方机器人和球的数据本来就是需要计算的，对于对方机器人只确定其位置，并不在线地判断其姿态，因此，给系统增加的计算负担是很有限的。通过实验也表明，增加对方机器人的定位，不会明显地影响整个系统的实时性能。

从全局视觉反馈的比赛数据分析出发，在 CDA 基本系统的基础上，我们又设计了 CDA 系统的四项扩展功能：技战术自动统计分析功能、比赛现场数据挖掘和策略发现功能、通过比赛数据支持基于内容的视频检索功能和面向硬件比赛的自动裁判功能，具体的设计思想包括：

(1) 技战术自动统计分析功能：在 CDA 系统的基础上，可以模仿人类的足球运动，在赛后快速统计出双方的控球时间、射门次数、失误次数、犯规次数等技战术数据。

(2) 比赛现场数据挖掘和策略发现功能：通过 GVCT 数据可以在线地和离线地分析比赛数据，在分析对方策略的基础上，形成新的对策，使比赛成为一个自动学习的过程。另外，在积累大量比赛数据的基础上还可以建立数据挖掘机，可望挖掘出开发人员没有料想到的、难以用一般策略表达的策略和规律。

(3) 通过比赛数据支持基于内容的视频检索功能：GVCT 数据与摄像机拍摄的视频录像在时间上可以建立严格的对应关系，而 GVCT 数据量很小，可以很方便地表达一个特定的比赛场景，因此可以作为基于内容的赛场视频检索的有力工具。例如图 4 所示：需要检索敌方的绿色机器人击球的瞬间，只要通过数据判断出 (B_x^i, B_y^i) 和 (O_{3x}^i, O_{3y}^i) 两点的距离符合一个距离标准，就可以在 CDA 系统中检索出图 4 的场面，进而根据时间对应关系，在比赛的视频文件中检索到相应的实际比赛场面。同样，图 5 对应本方防守反击的瞬间。

(4) 面向硬件比赛的自动裁判功能：由于在线地记录了比赛过程中每一时刻的 GVCT 数据，因此可以在这些数据的基础上建立自动裁判系统，也可以成为人工裁判的计算机辅助手段，对比赛自动化水平的整体提高将有很大的推动作用。

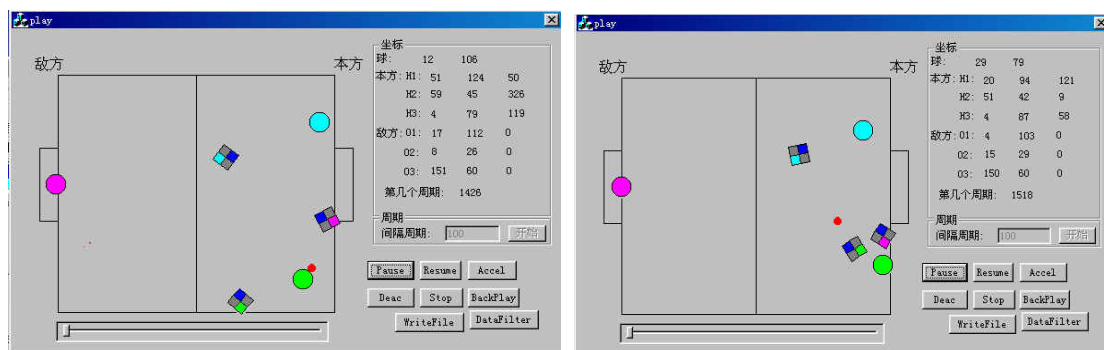


图 4 敌方队员击球的时刻

图 5 本方防守反击的时刻

5. 结论

本文介绍了我们开发的一个基于全局视觉反馈和运动轨迹约束的多智能体比赛数据分析系统。该系统可以实时地反馈赛场上多个运动目标(包括本方机器人、对方机器人和球)的位置或姿态数据,通过机器人运动轨迹的三个约束条件快速地分析位置和姿态数据的有效性,并对无效数据给出了处理方法。在此基础上通过图形仿真建立了比赛数据分析系统,可以支持比赛的回放功能。最后,探讨了以该系统为基础可以进一步研究、设计和开发的新功能。

致谢: 本文研究工作得到国家高技术发展(863)计划课题(课题编号:2001AA422200)和国家自然科学基金项目(项目号:60175025)支持。

参考文献:

- [1] N. Itsuki, M. hitoshi, H. Kazuo, et al. Soccer Sever: a tool for research on multi-agent systems. *Artificial Intelligence*, 1998, 12(2-3):45-52.
- [2] S.R. Hedberg, Robots playing soccer? RoboCup poses a new set of challenges in intelligent distributed computing, *IEEE Concurrency [see also IEEE Parallel & Distributed Technology]*, Volume: 5, Issue: 4, 1997, pp.13 -17.
- [3] G.F. Tong; W.D. Xiao; X.H. Xu, Design of RoboCup robot soccer global vision system, *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation*, Volume:1, 2000, pp.212 -214.
- [4] K.Kostiadis; H. Hu, Reinforcement learning and co-operation in a simulated multi-agent system, 1999 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 1999. IROS '99. *Proceedings.*, Volume: 2, 1999, Page(s): 990 -995.
- [5] C. Castelpietra, L. Iocchi, et al, Coordination among heterogeneous robotic soccer players, 2000 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Volume: 2, 2000, Page(s): 1385 -1390.
- [6] 刘宏 查红彬 陈可明 王鹏 余佚原, 基于短时运动分析的足球机器人碰撞预测模型, 《中国人工智能进展 2001》, 2001 年, 北京邮电大学出版社, pp. 906—910.
- [7] C.F. Marques, P.U. Lima, Vision-based self-localization for soccer robots, *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, Volume: 2, 2000, pp.1193 -1198.
- [8] J.J. Myung, H.S. Kim, S. Kim, J.H. Kim, Omni-directional mobile base OK-II, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000, pp.3449-3454.
- [9] M.K. Sahota, A.K. Mackworth, S.J. Kingdom, R.A. Barman, Real-time Control of soccer-playing robots using off-board vision: the dynamite testbed, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1995, pp.3690-3693.
- [10] W.M. Shen, J. Adibi, R. Adobbati, B. Cho, Building integrated mobile robots for soccer competition, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, pp.2613-2618.
- [11] H. Liu, H. Zha, S. Feng, A training method for robust recognition of color uniforms of soccer robots, *Proceedings of FIRA Robot World Congress*, 2002, pp.666-669.
- [12] 刘宏, 查红彬, 冯所前, 足球机器人视觉系统中彩色服装特征的自动获取, 《计算机科学》2003 年 11 月专刊, pp. 29—32.