

Sistema de Realidad Aumentada para enseñanza de Geometría

Gustavo Rovelo¹, Francisco Abad², Mari Carmen Juan² and Emilio Camahort²

¹Departamento de Sistemas Informáticos y Computación

²Instituto Universitario de Automática e Informática Industrial

Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera S/N 46022 Valencia, España

Abstract

Este artículo presenta el diseño e implementación de un sistema de Realidad Aumentada orientado a la enseñanza de conceptos abstractos en Geometría. Este sistema permite mostrar al alumno escenas 3D interactivas, que pueden ser exploradas desde multitud de puntos de vista y que le ayudan a mejorar su intuición espacial.

El sistema se puede utilizar en diferentes escenarios sin necesidad de hardware especializado. Se puede utilizar tanto en el aula, como herramienta de apoyo al profesor, como en casa, sirviendo de instrumento para el estudio personal.

El profesor puede crear nuevos ejercicios mediante una sencilla descripción de escenas basada en XML, y el sistema es capaz de corregirlos automáticamente, dando al alumno retroalimentación en tiempo real sobre sus respuestas.

En este artículo también presentamos la configuración idónea del entorno de trabajo derivada de nuestra experiencia. También presentamos una propuesta de utilización de distintos materiales para construir los marcadores que mejoran el proceso de detección de los mismos.

Keywords: Realidad Aumentada, Enseñanza de las Matemáticas, Intuición espacial.

Categories and Subject Descriptors (according to ACM CCS):

I.3.6 [Computer Graphics]: Methodology and Techniques—Interaction techniques

I.3.7 [Computer Graphics]: Three-Dimensional Graphics and Realism—Virtual Reality

I.3.8 [Computer Graphics]: Applications

1. Introducción

La enseñanza de las matemáticas ha representado siempre un reto para los profesionales de la educación. Convertir un concepto abstracto en palabras y ejemplos claros que permitan al alumno asimilarlo no es una tarea fácil, y no siempre se consigue. Además, se debe tener en cuenta que no todos los alumnos tienen la misma capacidad para comprender las explicaciones de cada tema.

Además de los factores humanos en el proceso de enseñanza, la manera tradicional de impartir las clases de matemáticas se ha basado únicamente en la pizarra y modelos 2D dibujados en ella. Representar, por ejemplo, vectores en el espacio o volúmenes de sólidos es difícil de conseguir y, muchas veces, difícil de entender para el alumno. En algunos casos se pide al alumno que construya maquetas con los modelos 3D que se ven en clase, o bien algún concepto como la suma de dos vectores. Esto facilita la comprensión del tema, pero en cambio exige una inversión de tiempo que se podría utilizar para estudiar conceptos más avanzados.

Por ello se deben proponer soluciones que permitan a los profesores contar con las herramientas necesarias para que los alumnos asimilen mejor los conceptos que por su naturaleza son difíciles de comprender. Así mismo se debe ofrecer a los alumnos la posibilidad de interactuar con los modelos presentados para conseguir a partir de la experiencia que adquieran su propia visión o intuición espacial.

Poco a poco se han ido incorporando nuevas tecnologías al aula para facilitar el proceso de la enseñanza. Los proyectores de diapositivas permiten al profesor mostrar material que refuerza su explicación. El uso de proyectores digitales conectados a computadoras permite al profesor usar software especializado en presentaciones y en ocasiones usar software interactivo, como por ejemplo *applets* Java.

Sin embargo, aún cuando este tipo de tecnología está cambiando la manera de impartir clase, en algunos casos sigue siendo insuficiente para facilitar la comprensión de los conceptos más abstractos. La Realidad Aumentada (RA) combina tecnología proveniente de los campos de visión por computador, reconocimiento de patrones y síntesis de imágenes. Su objetivo principal es superponer información útil sobre la percepción que el usuario tiene de la realidad. Dicha información viene codificada típicamente en forma de imágenes generadas por ordenador y permite enriquecer la experiencia del usuario.

De acuerdo con Azuma [?] un sistema de RA debe cumplir con las siguientes características:

1. Combinar información real con información virtual
2. Debe permitir la interacción del usuario con el sistema en tiempo real
3. El proceso de registro de las imágenes sintéticas debe ser en 3D

De acuerdo con la definición anterior el dispositivo de visualización utilizado no influye en la clasificación de un sistema como RA, siempre y cuando se respeten las características antes mencionadas.

La RA en suma ha propuesto una nueva metodología de trabajo que permite gozar de algunos de los beneficios de los entornos virtuales con un significativo menor coste económico y por supuesto ganando en movilidad. Desde cuentos infantiles [?] hasta complejos sistemas distribuidos pensados para la educación a distancia [?], utilizan las ventajas de la RA para proporcionar herramientas de trabajo novedosas con el objetivo de facilitar la enseñanza y captar la atención del alumno. Otra aplicación destacada en la que se ha utilizado la RA es el sistema propuesto en [?] para la enseñanza de la relación entre la Tierra y el Sol.

El presente trabajo propone la utilización de técnicas de RA para facilitar la visualización y manipulación de modelos geométricos en el espacio 3D. La idea principal es evitar una representación plana (el dibujo en la pizarra) de lo que realmente ocupa un volumen en el espacio. Proponemos una herramienta que permite al alumno interactuar con modelos virtuales usando elementos reales (los marcadores). Así podrá mejorar su percepción espacial viendo e interactuando con los modelos en el espacio 3D. Además, nuestro sistema se ha diseñado para usarse fundamentalmente con una webcam y un ordenador de escritorio o portátil, sin necesidad de instalaciones especiales. Esto permite su utilización tanto en el aula como en casa.

Nuestra herramienta es por tanto versátil y económica. En este artículo describimos la herramienta y resultados preliminares de su utilización por parte de un grupo de alumnos. La herramienta permite crear, animar, borrar y manipular objetos así como realizar operaciones geométricas como sumar vectores. Para el profesor nuestro sistema permite configurar modelos, ejercicios y soluciones a esos ejercicios. Nuestros tests demuestran que se trata de una aproximación eficaz a la enseñanza de la geometría del espacio 3D.

El resto del artículo se organiza como sigue. La siguiente sección presenta el estado del arte en RA aplicada a la enseñanza. En las dos secciones siguientes se enumeran las características del sistema y se muestra su estructura. En el siguiente apartado se muestra un ejemplo de uno de los ejercicios que se pueden implementar en el sistema, y a continuación se discuten los resultados de los tests preliminares en los que han participado usuarios. Finalmente se presentan las conclusiones y describen las mejoras que se han de implementar en la aplicación, como parte del trabajo futuro.

2. Antecedentes

Esta sección revisa los trabajos más relevantes en el uso de la Realidad Aumentada aplicada al campo de la educación. Estos sistemas, tienen características comunes, como el hecho de ser sistemas monousuario o multiusuario. Otro criterio de clasificación es que algunos funcionan de manera distribuida y otros funcionan solo de manera local. Por último, también se pueden clasificar según áreas de interés. Sin embargo, así como estos sistemas comparten ciertas características, existe una clara diferencia en el paradigma utilizado para enseñar. De esta manera se pueden clasificar en cuatro paradigmas diferentes. Los paradigmas son: Clase magistral, Sistemas colaborativos, Autoaprendizaje y juegos infantiles.

2.1. Clase magistral

Las Clases magistrales, son el paradigma educativo tradicional. En ellas es el profesor quien lleva el control de la clase. El alumno permanece como receptor pasivo de la información que se le proporciona.

Un buen ejemplo de los sistemas que siguen el paradigma de las clases magistrales guiadas por el profesor es el *Multimedia Augmented Reality for E-Learning* (MARIE) [?]. Diseñado como una herramienta para la educación a distancia de ingeniería.

El sistema permite al usuario seguir el guión con el contenido del curso, según el diseño del profesor. También permite a los usuarios interactuar con información tanto 2D como 3D y ver al mismo tiempo las explicaciones del profesor. Se puede usar con un HMD o con un monitor de ordenador, por lo que se puede usar por más de un estudiante a la vez, o en el aula. También incorpora un módulo de sonido que puede mezclar dos fuentes: la explicación pregrabada y la voz del profesor. Uno de sus inconvenientes es que la interacción con el sistema se basa en la combinación de la manipulación de los marcadores y el uso del teclado y el ratón, lo que puede resultar incómodo para algunos usuarios.

El trabajo presentado en [?] describe tres desarrollos aplicados a la educación que hacen uso de la RA. El primer ejemplo es un libro de texto enriquecido. En este sistema se superponen gráficos 3D sobre un libro de texto tradicional para mejorar la explicación del concepto. Para ello utilizan una cámara web para identificar el patrón impreso sobre la hoja del libro. El segundo sistema se dedica a la enseñanza de Matemáticas en el entorno de un aula. El profesor da explicaciones sobre un modelo que los alumnos pueden ver en pantalla. Utilizando una cámara web y los marcadores impresos y colocados sobre su escritorio, el profesor puede interactuar con los modelos virtuales de sólidos como si se tratara de modelos reales. El último sistema permite enriquecer el esqueleto de dinosaurios con información gráfica sobre cómo podría ser su cuerpo. Además, también permite a los usuarios experimentar con algunos aspectos que todavía están en estudio, como puede ser el color de la piel de algunas especies. El artículo también presenta el desarrollo de un sistema de autor para preparar esta clase de contenido disminuyendo la necesidad de conocimientos previos sobre modelado 3D.

El sistema descrito en [?] combina Web3D y la RA para construir un sistema de ayuda a la enseñanza de conceptos de ingeniería mecánica. Web3D es un conjunto de aplicaciones que implementan el estándar X3D para transmisión de escenas y de objetos 3D a través de internet usando XML. Normalmente se usan plugins instalados en un navegador web para visualizar estos modelos. Web3D permite al usuario interactuar con modelos 2D y 3D que pueden estar animados, y puede seleccionar qué contenido le resulta más interesante para seguir estudiando. El módulo de RA está embebido en el navegador y funciona como una aplicación estándar de RA y hace uso de la biblioteca Microsoft Foundation Class (MFC) para crear su interfaz de usuario. El sistema permite usar modelos almacenados en formatos estándar. Este sistema se puede utilizar a través de Internet o de manera local durante una clase o en el laboratorio.

2.2. Sistemas colaborativos

En los sistemas colaborativos se hace énfasis en el trabajo en grupo. Se favorece la interacción entre compañeros, para conseguir que entre varios se resuelvan problemas complejos y se genere un conocimiento en base a la experiencia colectiva.

El primero de estos sistemas y quizás uno de los más importantes es Construct3D [?], un sistema de Realidad Aumentada construido sobre la plataforma colaborativa Studierstube [?]. Este sistema permite a varios usuarios provistos de cascos HMD trabajar concurrentemente sobre la misma tarea. Según los autores, Construct3D no es una herramienta de diseño 3D profesional. El objetivo del trabajo era crear un interfaz de usuario amigable utilizando el Personal Interaction Panel (PIP) [?]. Este panel permite al usuario interactuar con objetos virtuales a través de una interfaz tangible y de un menú en el que puede seleccionar opciones y ejecutar acciones. Esta plataforma se diseñó originalmente para la enseñanza de geometría. Construct3D necesita un espacio dedicado para instalar el equipo, y localiza el origen del sistema de coordenadas virtual en el centro de la habitación. El sistema puede trabajar con líneas, puntos, planos y algunos volúmenes sólidos como esferas y conos. También es posible guardar las escenas en ficheros y tiene un subsistema de audio que asiste al usuario en el desarrollo del ejercicio. Por medio de encuestas, los autores encontraron que algunos usuarios preferían los sistemas CAD de escritorio tradicionales. Sin embargo, los mismos usuarios valoraban la facilidad de uso de Construct3D y lo encontraban útil como herramienta de aprendizaje.

ARiSE (Augmented Reality in School Environments) [?] es una plataforma construida con el esfuerzo conjunto de varias universidades europeas, y su objetivo es facilitar la transmisión de conocimientos al estudiante. El sistema permite a varios estudiantes interactuar y trabajar en equipo. También incluye las herramientas necesarias para que un usuario no experto en RA pueda usarlo y generar contenido fácilmente. Los resultados de las pruebas de usabilidad fueron descritos en [?]. El objetivo de dichas pruebas fue evaluar la usabilidad del sistema y la calidad pedagógica del material presentado por el sistema. Por usabilidad se entiende lo fácil que resulta el sistema de usar y de aprender a usarlo. Por calidad pedagógica entendemos en qué medida el sistema ayuda a mejorar el proceso de aprendizaje. De forma parecida a otros estudios de este tipo, se encontró que la novedad de esta tecnología estimula al estudiante a utilizar la herramienta, encontrándola divertida y motivante. Sin embargo, dichas pruebas revelaron que los usuarios esperaban algo más del sistema, especialmente con respecto a la retroalimentación cuando se ejecuta una acción. El usuario esperaba que de alguna manera el sistema le informara si la acción desarrollada cumplió su objetivo o no. Los tests de usabilidad mostraron también la necesidad de mejorar la interacción con el usuario, ya que hubo problemas de precisión usando la herramienta. Cabe mencionar que ninguno de los alumnos que participó en las encuestas tenía conocimientos previos de RA.

2.3. Autoaprendizaje

En el paradigma de auto aprendizaje, se le da total libertad al alumno para que genere conocimiento en base a lo que investiga. El profesor se convierte en un guía de su aprendizaje, orientándolo.

CyberMath [?] es un ejemplo de un sistema que soporta diferentes paradigmas educativos. Sin embargo, su diseño se inspiró en un museo, en el que cada sala presenta un tema distinto. Así, el alumno puede repasar cada tema sin la ayuda de un profesor. Es un entorno virtual basado en la plataforma DIVE [?], que se puede usar en un entorno inmersivo tipo CAVE o con un HMD. Permite trabajar a varios usuarios a la vez replicando el contenido en cada máquina cliente, conectadas a través de Internet. También dispone de aulas, en las que avatares simulan la presencia de los usuarios. El uso de gráficos realistas permite que la aplicación sea más atractiva para el usuario. El sistema permite importar modelos o animaciones construidos en Mathematica, lo cual le da flexibilidad de uso. Como resultado de las pruebas de usabilidad del sistema, se observó que en algunas ocasiones el uso de los avatares obstruía la visibilidad del usuario.

Otra aplicación que hace uso de técnicas de RA en la educación con un enfoque de autoaprendizaje es la presentada por Núñez y otros [?]. En este sistema se presentan modelos tridimensionales de compuestos inorgánicos descritos en VRML para mejorar la percepción espacial del estudiante. El sistema usa un PC normal con seis cámaras USB conectadas mediante un concentrador para permitir el trabajo simultáneo de varios usuarios, de manera individual o por pequeños grupos. La secuencia de video obtenida por cada cámara se reproduce en una ventana independiente, para permitir que todos los alumnos puedan observar el trabajo de sus compañeros. Para ello se utiliza el proyector del aula. Los resultados obtenidos tras varias pruebas en la Universidad Jaime I de Castellón, España, muestran que los alumnos encuentran el sistema muy interesante y permite captar su atención e incrementar su motivación.

En [?] se presenta la evaluación de dos versiones de un sistema de "Química aumentada". Se ha diseñado para interactuar y componer modelos tridimensionales de moléculas orgánicas a partir de modelos almacenados en una base de datos. El sistema permite crear moléculas usando herramientas representadas mediante marcadores 2D, imitando el modelo de bolas y varillas usado tradicionalmente en la enseñanza de Química. El sistema se probó con estudiantes de secundaria, que en su mayoría lo encontraron atractivo y fácil de usar a pesar de que interactuar con el sistema resultaba más complejo que con el modelo de bolas y varillas tradicional.

2.4. Juegos infantiles

Finalmente, el aprendizaje lúdico, como su nombre lo dice, es aprender jugando. Hacer que los conceptos que se estudian lleguen al alumno a través de actividades divertidas.

Algunos sistemas de este tipo se han desarrollado dentro de nuestro grupo de investigación. Uno de ellos es el Sistema de Realidad Aumentada para conocer el interior del cuerpo humano [?]. El sistema utiliza interfaces tangibles para que el usuario pueda aprender la estructura anatómica del interior del cuerpo humano. El maniquí utilizado consiste en un cuadro de madera sobre el que se ubican los marcadores y una tela a la que se le hicieron cortes que pueden ser abiertos y cerrados con cremalleras. De esta manera el usuario utilizando un HMD puede al abrir el cierre asomarse al interior del cuerpo, observando en la parte baja del abdomen la zona de los intestinos, o bien en la parte alta, la zona del estómago. En las pruebas realizadas durante la Escuela de Verano de la UPV, participaron 40 niños entre 8 y 10 años, que encontraron el sistema fácil de usar y estimulante para su aprendizaje, y demostraron interés por utilizarlo en otras áreas de conocimiento.

Finalmente, en [?] se presentan tres juegos de RA enfocados a la concienciación de los niños en temas de conservación del medio ambiente. En las pruebas de estos tres juegos participaron 160 niños de la Escuela de verano de la UPV. En el primer juego *Magnetic Cubes* el usuario debe encontrar alguno de los animales en peligro de extinción que contempla el sistema, y si acierta, puede elegir si desea ver un video con información sobre dicho animal. Usa como interfaz tres cubos que se mantienen unidos uno a otro magnéticamente. A través de la combinación de los marcadores colocados en las caras visibles de los cubos el usuario realiza las acciones necesarias para interactuar con el sistema. El siguiente juego denominado *Finding pairs*, es el clásico juego de memoria, en donde el usuario debe encontrar la tarjeta que completa el par con el animal en peligro de extinción mostrado. Si el usuario acierta, tiene la posibilidad de ver un video con información relevante sobre la especie que ha encontrado. El tercer juego, fue desarrollado para funcionar en un teléfono móvil, y en él el usuario debe identificar la imagen que aparece sobre el marcador, para de esa manera colocarlo en el cesto de basura que corresponda a la categoría de reciclado adecuada. En total se usan 5 marcadores diferentes, uno para cada contenedor de basura, y uno sobre el que se muestra el objeto a clasificar.

Todos los sistemas presentados son muy completos. Sin embargo, en algunos casos, el coste de la infraestructura del sistema los hace inalcanzables para un presupuesto reducido. Otro problema importante es que en algunos de estos sistemas el alumno permanece como espectador en el proceso de aprendizaje. Con el diseño de la aplicación que presentamos queremos afrontar

estos problemas. Damos al alumno buena parte del protagonismo en el proceso del aprendizaje. Por otra parte, el profesor dispone de una herramienta versátil para mejorar la calidad de sus explicaciones y evaluar al alumno. Y sobre todo, pensamos en un diseño austero que permita implantar el sistema sin invertir una fuerte cantidad de dinero.

3. Descripción del sistema

Presentamos aquí un sistema de RA de bajo coste para facilitar el entrenamiento de la percepción espacial, en el que el alumno se convierte en sujeto activo durante su aprendizaje.

En las siguientes secciones se muestran los detalles de la implementación del sistema. De acuerdo con nuestra experiencia, la forma más cómoda para trabajar con el sistema es la que se muestra en la figura 1.

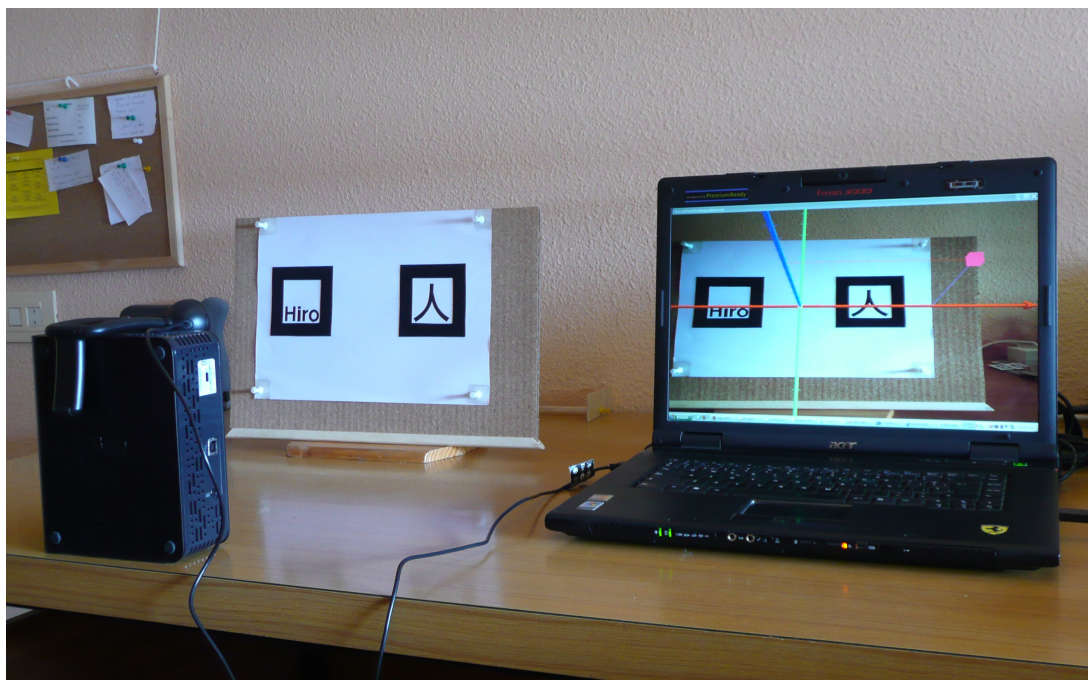


Figura 1: Configuración aconsejada del espacio de trabajo.

Nuestro sistema está diseñado de manera que se pueda utilizar por todos los alumnos en casa. Por ello, los requisitos de hardware se limitan a un PC actual y una cámara web. El resto de los componentes del sistema se pueden construir a partir de materiales comunes disponibles en el mercado.

El sistema permite construir escenas con las siguientes primitivas: sistemas de coordenadas 3D, puntos, vectores, modelos 3D (en VRML) y volúmenes sólidos como conos, esferas, cajas, cilindros y planos. El sistema también permite definir grupos de primitivas, sobre los que aplicar acciones.

Dichas acciones pueden ser: situar un objeto en la escena, dibujar primitivas usando la herramienta de dibujo del sistema, aplicar las transformaciones básicas definidas en la descripción de la escena (traslaciones, rotaciones y escalados), seleccionar entre varias opciones para responder las preguntas planteadas, reiniciar el trabajo con la escena eliminando las primitivas que ha dibujado y guardar el trabajo que ha realizado para utilizarlo en una sesión posterior. Cada una de las acciones se puede asociar a un marcador distinto, que el usuario deberá seleccionar y mover dentro de la escena. Por supuesto, el usuario podrá siempre cambiar el punto de vista de la escena moviendo la cámara.

3.1. Tipos de ejercicios

Otro aspecto importante en cualquier aplicación de enseñanza asistida por ordenador es la posibilidad de realizar evaluaciones en tiempo real de los ejercicios. El sistema permite implementar tres tipos de ejercicios, donde el alumno debe:

- elegir una entre varias respuestas,
- dibujar la respuesta, y
- dar la secuencia de transformaciones necesarias para transformar un estado inicial de la escena en un estado final dado.

El primer tipo de ejercicio es el de respuesta múltiple, donde el profesor plantea una pregunta sobre la escena presentada, y el alumno debe elegir entre una de cuatro posibles respuestas. El sistema entonces puede comprobar si la respuesta es correcta y, en caso contrario, ofrecer una explicación adicional sobre la respuesta esperada (véase la figura 2).

Para elegir una de las opciones, el usuario deberá cubrir momentáneamente el marcador, ya sea parcial o totalmente, mientras que se encuentra sobre la respuesta elegida. Para cubrir el marcador, el usuario puede usar simplemente un dedo, tal y como muestra la figura 2. De esta forma se simula el clic de ratón en una interfaz tradicional.

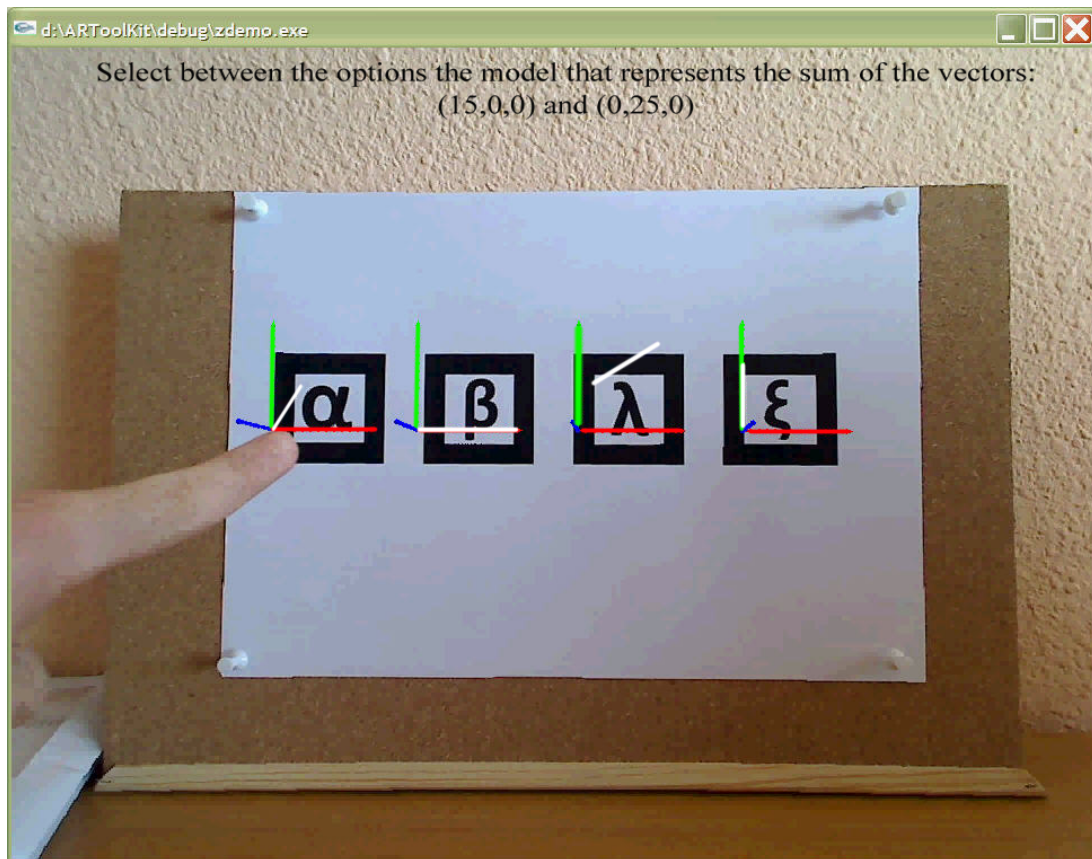


Figura 2: Ejercicio de respuesta múltiple; los ejes están dibujados en rojo x, en verde y y en azul z en un sistema de coordenadas dextrógiro.

En el segundo tipo de ejercicios, el estudiante debe dibujar la primitiva en la posición y orientación que responda al problema planteado. Por ejemplo, ante un ejercicio de suma de vectores, el alumno deberá seleccionar el marcador para dibujar un vector y calcular el vector resultado.

Un problema que plantea este tipo de ejercicios es la precisión del dibujado a mano alzada en un espacio 3D. El sistema ofrece una serie de ayudas para situar un objeto correctamente en 3D. En particular, el sistema permite mostrar la proyección sobre los ejes principales de la posición del marcador (véase la figura 3). Estas ayudas permiten al usuario posicionar adecuadamente el puntero en el espacio. Por otro lado, el sistema también tiene un rango de tolerancias ajustable, que permite determinar si la respuesta del alumno es correcta o no.

Por último, el sistema permite implementar ejercicios que presentan una escena compuesta por una serie de primitivas y el estado al que se desea llegar. En este caso, el alumno debe desarrollar las operaciones necesarias para transformar la escena

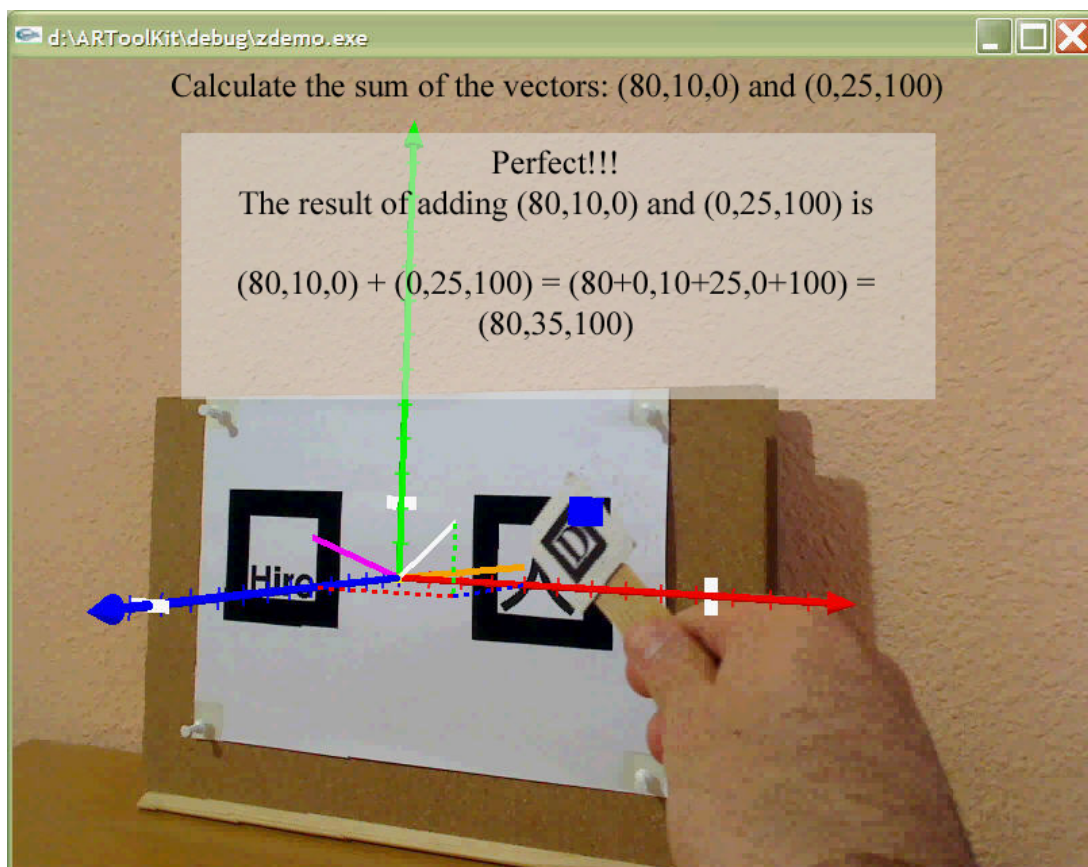


Figura 3: Ejercicio donde el alumno debe dibujar el resultado.

inicial al estado final. Un ejemplo de este tipo de ejercicios es cuando el alumno debe aplicar dos transformaciones, una traslación y una rotación, para llegar a la posición deseada. Este tipo de ejercicios permiten darse cuenta de la importancia del orden en el que se aplican las transformaciones (véase la figura 4).

Cada transformación va asociada a un marcador. El orden de aplicación de las transformaciones al objeto está definido por el orden en el que se introducen los marcadores en la escena. En el ejemplo de la figura 4, el usuario debería mostrar primero el marcador de rotación y posteriormente el de traslación para conseguir el resultado correcto. Las transformaciones que se aplicarán a las primitivas dentro de la escena, deben estar definidas en el archivo de la escena correspondiente, en la sección de acciones permitidas.

Nuestro sistema permite así plantear tres tipos de ejercicios geométricos que manejan tanto primitivas como distintos tipos de transformaciones. Estos ejercicios sirven para que los alumnos adquieran intuición espacial en el manejo de dichas primitivas y transformaciones 3D.

3.2. Otras características del sistema

El profesor podrá elegir en el momento de crear la descripción de la escena si el resultado de aplicar una transformación sobre las primitivas se muestra con una animación. La animación mostrará cuadro a cuadro el cambio de posición de la primitiva. En caso de que el usuario cometa algún error, existe un marcador que simula la acción de un borrador, y que reinicia la escena a su estado inicial (como fue cargada desde el archivo). También se pueden eliminar primitivas de la escena. Para ello se puede usar la opción del menú correspondiente y seleccionar la primitiva a borrar en la lista desplegable (ver figura 5).

Cada ejercicio puede usar un conjunto de marcadores distinto. De esa forma, cambiar de un ejercicio a otro es tan sencillo

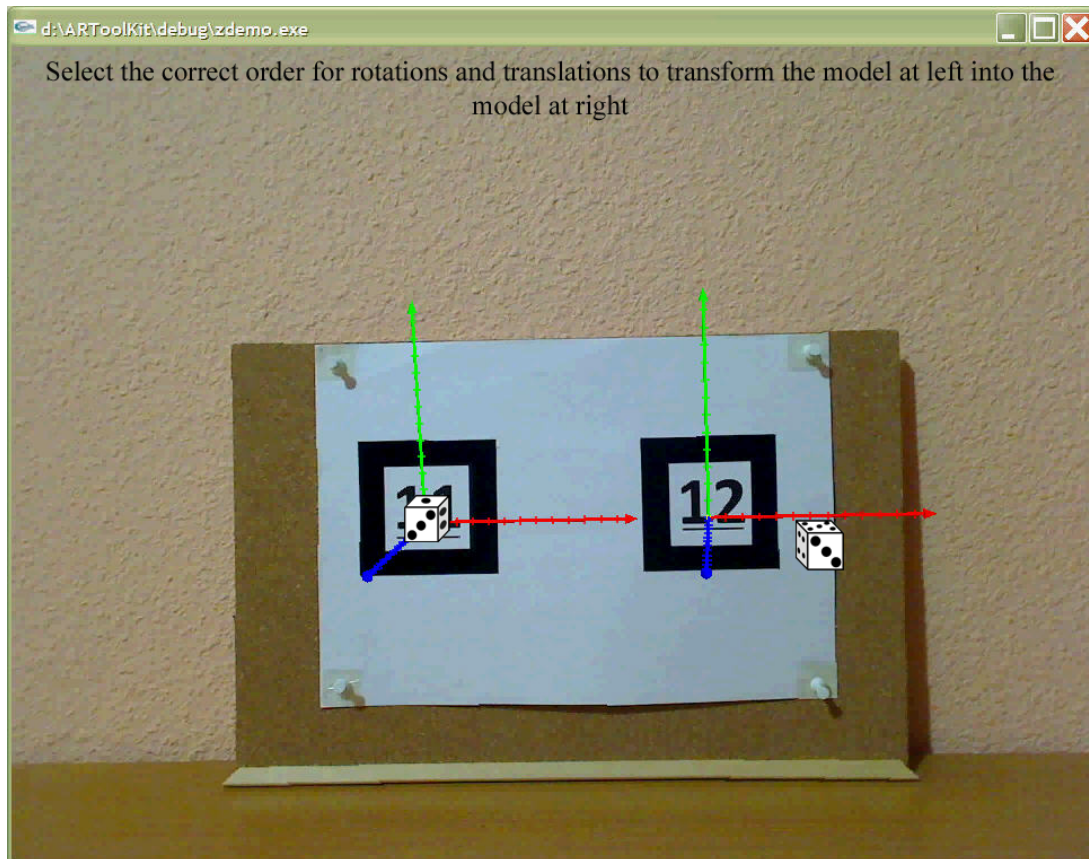


Figura 4: El alumno debe aplicar las transformaciones en el orden oportuno.

como cambiar los marcadores de fondo. Se podría disponer de un conjunto de fondos a modo de libro que permitiera cambiar fácilmente de un ejercicio a otro.

Aparte de la interacción mediante los marcadores existe otra forma de interactuar con el sistema: el menú en pantalla. Para minimizar el uso del teclado, la aplicación permite introducir un marcador para mostrar el menú principal. En ese momento se interrumpe la interacción con la escena, y se muestra la lista de opciones principales: reiniciar la escena, guardar la escena, resolver el ejercicio, mostrar/ocultar la descripción de la escena, borrar primitivas y salir (véase la figura 5). Para los usuarios avanzados se han definido una serie de atajos de teclado para lanzar acciones sin necesidad de interactuar con el menú.

3.3. Escenarios de la aplicación

Considerando las características descritas, planteamos el uso de la aplicación en dos escenarios distintos: durante una clase, como material de apoyo a la explicación del profesor, y en el laboratorio o en casa, donde el alumno resuelve ejercicios planteados por el profesor.

En el primer escenario, el profesor es quien dispone de los marcadores que se van a utilizar en la sesión. Cuando el profesor desee reforzar algún concepto, tan sólo deberá seleccionar los marcadores correspondientes en el fondo, y apuntar la cámara. Una vez que el sistema detecta los marcadores, el profesor puede manipular la escena según las acciones previstas en su definición. En cualquier momento es posible mover la cámara para cambiar el punto de vista y observar el modelo desde otra posición.

En el segundo escenario la principal diferencia es que las instrucciones para la realización del ejercicio están codificadas en el fichero de escena. En ambos casos, el usuario puede guardar el estado actual de la escena y continuar en otra sesión. La ventaja de usar ficheros para almacenar la descripción de las escenas es que el profesor puede definir dichos ficheros y puede

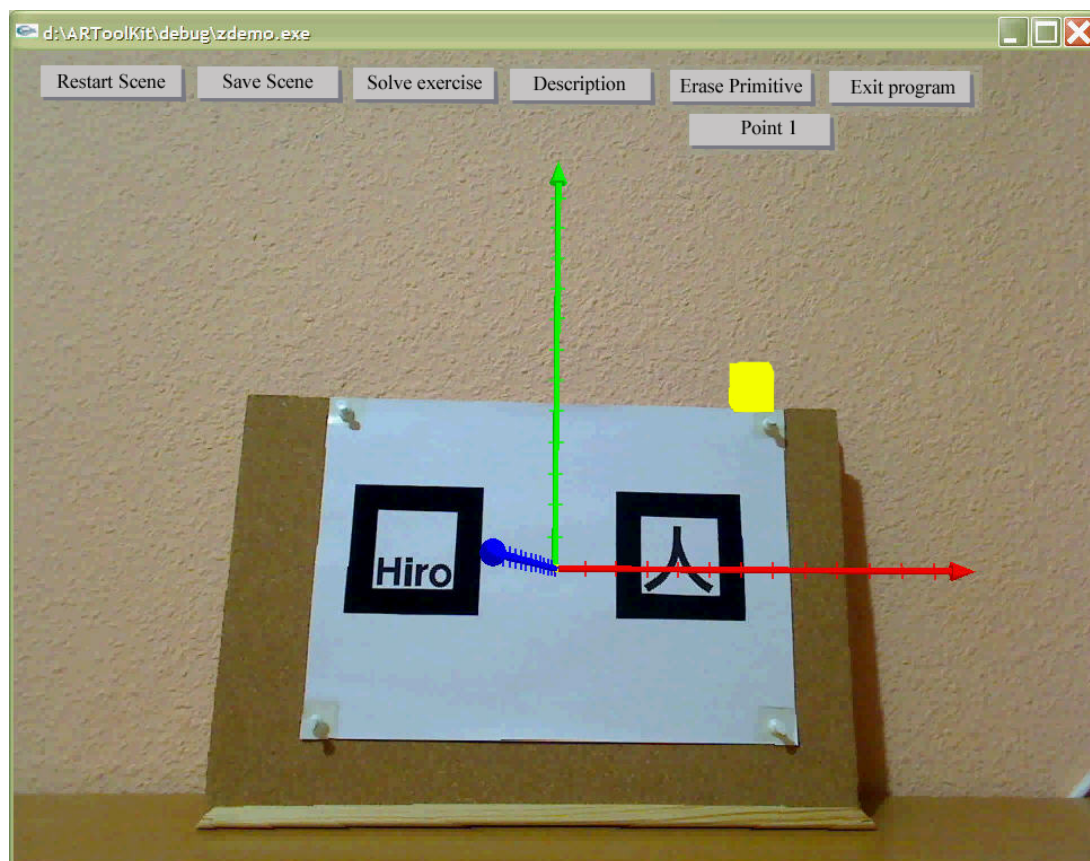


Figura 5: Para eliminar una primitiva el usuario la selecciona mediante el cursor desde la lista que aparece en el menú.

distribuirlos a los alumnos mediante correo electrónico o mediante una página web. También pude crear distintos ficheros y enviarlos por separado a distintos alumnos o grupos con el propósito de evaluar sus conocimientos.

4. Detalles de implementación

Nuestro sistema únicamente necesita un ordenador de tipo PC (no muy antiguo) y una webcam. La webcam permite capturar el vídeo sobre el que se mostrará la escena, que se dibujará alineada con los marcadores utilizados como fondo (véase por ejemplo, la figura 5). Para resolver el *tracking* de la cámara se ha usado la librería ARToolKit [?].

Cada ejercicio se representa en el sistema como un grafo de escena que contiene las primitivas gráficas y las acciones que se pueden ejecutar sobre el grafo. Cada escena viene definida por dos marcadores que cumplen dos objetivos: identificar la escena y definir la posición y orientación del sistema de coordenadas donde está definida. En nuestras pruebas, dichos marcadores están contruidos sobre una hoja de papel pegada a un tablero de corcho. El usuario puede cambiar en cualquier momento el punto de vista desde donde se visualiza la escena moviendo la cámara con respecto a dichos marcadores.

4.1. Conjunto de marcadores

Cada acción permitida dentro de la escena está asociada a un marcador. Dichos marcadores, que son más pequeños que los usados como fondo, vienen fijados a un trozo de madera a modo de varita, para facilitar su manejo y orientación dentro de la escena (véase la figura 6).

La figura 1 muestra la configuración típica del entorno de trabajo para la utilización del sistema. En esta configuración el usuario puede colocarse cómodamente del lado de la mano con la que escribe.

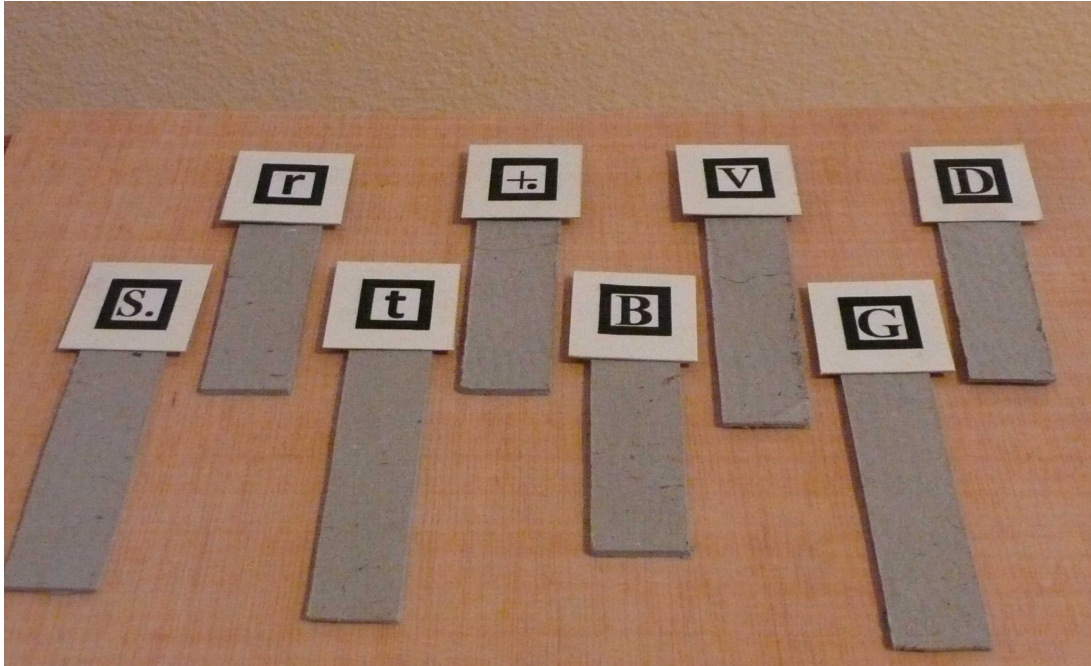


Figura 6: Distintos marcadores utilizados para ejecutar acciones.

Uno de los problemas principales de las aplicaciones que usan ARToolKit es que el algoritmo implementado para la detección de los marcadores es muy sensible a las condiciones de iluminación. Los reflejos producidos por las luces de la habitación sobre la tinta negra de los marcadores reducen la fiabilidad del tracking. Esto provoca frustración en los usuarios, puesto que, aparte del propio ejercicio, deben preocuparse de la posición relativa entre la cámara, el marcador y las luces. Para buscar una solución a este problema, se probaron cuatro materiales distintos para construir los marcadores: tinta de impresora láser, tinta de impresora de inyección, cartulina negra y papel de terciopelo. Los mejores resultados se obtuvieron con el papel de terciopelo. Al ser un material mate, se reducen los brillos y se facilita el proceso de segmentación de ARToolKit (véase la figura 7). Para facilitar la construcción de los marcadores, la parte interior de los mismos, que sirve para identificarlos, se sigue imprimiendo con tinta en lugar de usar papel de terciopelo.



Figura 7: Resultados de la segmentación de un marcador hecho con papel terciopelo (izquierda) y tinta de impresora de inyección (derecha).

Como se ha comentado, cada escena viene identificada por dos marcadores, lo que permite reducir los problemas que se producen cuando el usuario tapa parcial o totalmente uno de los marcadores. La figura 8 muestra un ejemplo de este problema.

Cuando el sistema es capaz de reconocer ambos marcadores, combina la información extraída de cada uno de ellos para obtener un resultado más estable.

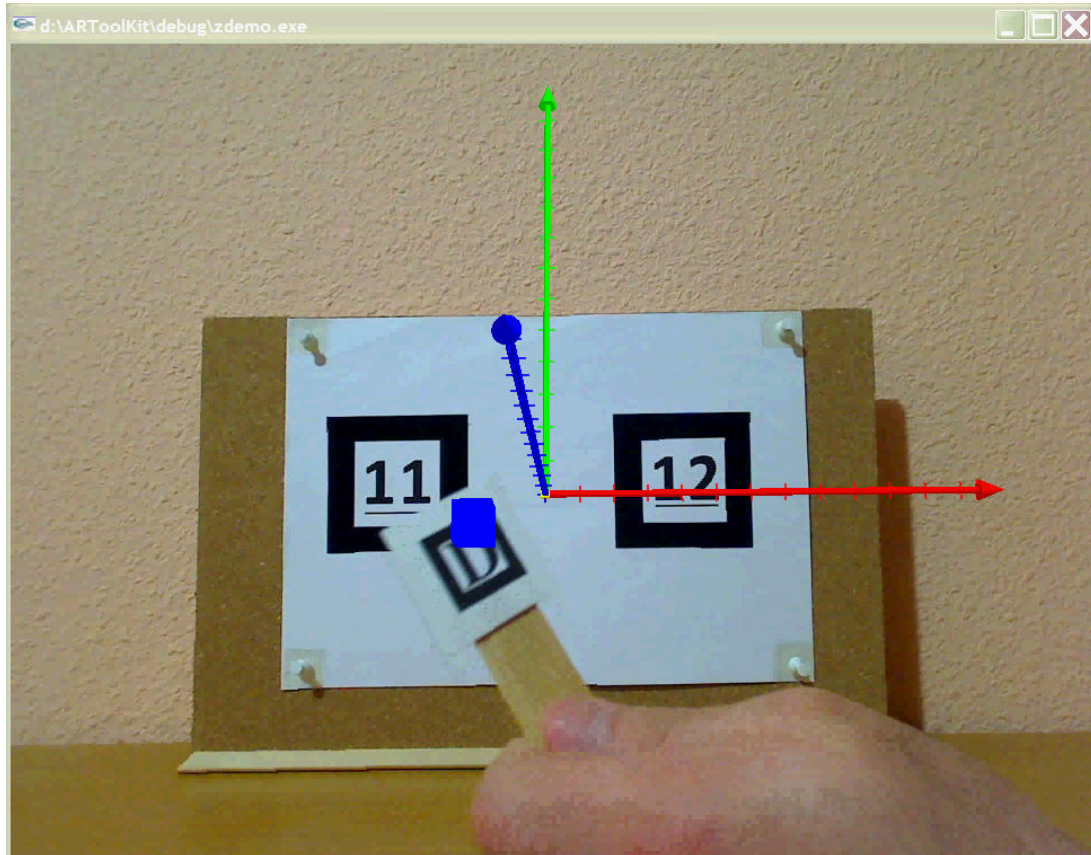


Figura 8: Usar dos marcadores permite al sistema funcionar incluso cuando uno de ellos no es visible.

4.2. Ficheros de configuración

El sistema trabaja con varios tipos de ficheros:

- los propios marcadores,
- una lista con los marcadores disponibles en el sistema,
- la lista con las herramientas que se pueden utilizar,
- los marcadores que definen el fondo de cada ejercicio, y
- el fichero de sesión.

Para facilitar la creación, edición y lectura de estos ficheros se utiliza un formato basado en XML. Los marcadores se describen mediante el formato de ARToolKit.

El fichero que contiene la lista de marcadores es único en el sistema y contiene la ruta del fichero donde se encuentra cada marcador. De esta forma, cada marcador está identificado en el sistema por su posición dentro de este fichero, desacoplando cada ejercicio de la ruta donde se encuentran los ficheros de marcadores. Esto permite reutilizar marcadores en distintos ejercicios y sustituir, añadir o eliminar marcadores con facilidad.

La lista de herramientas disponibles relaciona acciones con marcadores. Cada ejercicio podrá especificar las acciones permitidas.

Para establecer el sistema de coordenadas de cada ejercicio, en el fichero de definición de fondos, se define la posición del origen con respecto a cada marcador. Por defecto, dicho sistema de coordenadas está situado en el centro de los dos marcadores de fondo de cada ejercicio.

Cada fichero de sesión puede contener varios ejercicios. Cada ejercicio tiene la siguiente información:

- una descripción donde el profesor explica lo que se espera que aprenda el alumno con el ejercicio,
- los identificadores de los dos marcadores usados como fondo,
- la lista de primitivas que se podrán dibujar en la escena, aunque éstas no sean visibles inicialmente,
- la lista de acciones que se pueden realizar en la escena,
- el máximo número de primitivas que podrá insertar el usuario en la escena, y
- uno o más grupos de primitivas.

Los grupos de primitivas especifican qué primitivas del ejercicio se pueden manipular. A cada grupo de primitivas se le pueden asignar una o más acciones que afectarán a las primitivas que estén dentro del grupo. Las primitivas que no están incluidas en ningún grupo no se verán afectadas por ninguna acción que modifique la escena.

5. Ejemplo

Esta sección describe un ejemplo de uso del sistema. El objetivo del ejemplo mostrado en la figura 9 es estudiar la suma vectorial. Para ello, el profesor debe preparar una escena con los elementos necesarios. A continuación se muestra un extracto de una posible implementación del ejercicio:

```
<SCENE>
...
<PRIMITIVESLIST>
...
  <VECTOR>
    <PROPERTIES>
      IDENT VECTOR1
      COLOR 1.0 0.647 0.0 1.0
      WIDTH 5
      COMPONENTS 1
      VISIBLE 0
    </PROPERTIES>
  </VECTOR>
  <VECTOR>
    <PROPERTIES>
      IDENT VECTOR2
      COLOR 1.0 0.0 1.0 1.0
      WIDTH 5
      COMPONENTS 1
      VISIBLE 0
    </PROPERTIES>
  </VECTOR>
  <VECTOR>
    <PROPERTIES>
      IDENT VECTOR3
      COLOR 1.0 1.0 1.0 1.0
      WIDTH 5
      COMPONENTS 1
      VISIBLE 0
    </PROPERTIES>
  </VECTOR>
</PRIMITIVESLIST>
<ACTIONLIST>
  DRAWVECTOR 1
  SUMVECTOR 1
</ACTIONLIST>
<GROUPS>
  <GROUP>
```



```
<ACTIONS>
  SUMVECTOR
</ACTIONS>
<PRIMITIVES>
  VECTOR1
  VECTOR2
</PRIMITIVES>
<RESULT>
  VECTOR3
</RESULT>
</GROUP>
</GROUPS>
</SCENE>
```

Al inicio se ve la descripción de las propiedades de cada primitiva en la escena. Se observa también la enumeración de las acciones permitidas en la escena: dibujar vectores y calcular su suma. También se puede ver cómo se agrupan las primitivas. En este caso, se especifica cuáles serán los operandos, y dónde se deberá poner el resultado.

Inicialmente, al apuntar la cámara a los marcadores de fondo, se muestra únicamente el sistema de coordenadas. Para dibujar los vectores a sumar, el profesor debe seleccionar la herramienta de dibujo adecuada e introducirla en el campo de visión de la cámara. Una vez que el sistema detecta el nuevo marcador, inmediatamente entra en modo de dibujo, añadiendo ayudas visuales sobre los ejes para posicionar más fácilmente el vector en el espacio.

Una vez que se han dibujado los operandos, el profesor deberá introducir en la escena el marcador asignado a la acción de suma vectorial. El sistema mostrará el resultado de sumar los vectores automáticamente. Una vez que se ha completado el ejemplo, el profesor podrá mover la cámara para observar la escena desde otro punto de vista.

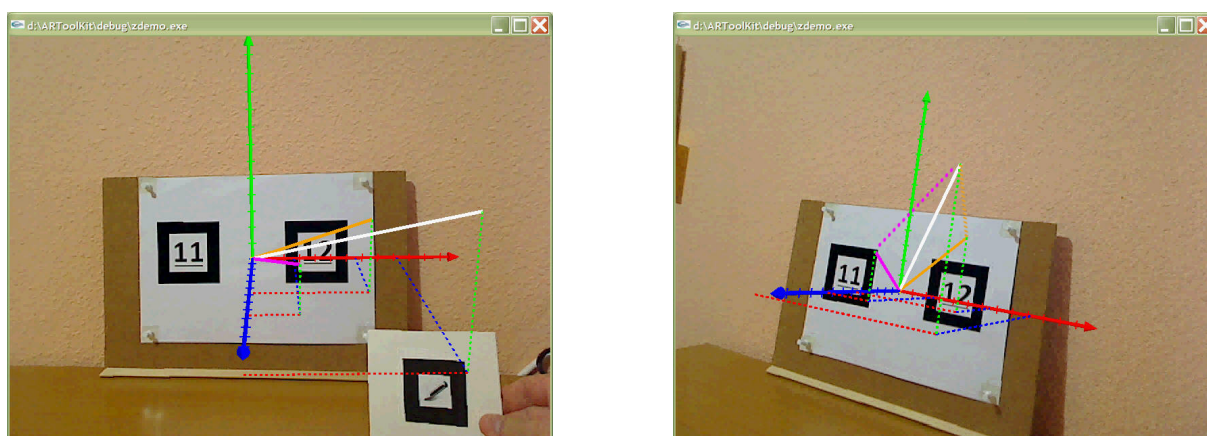


Figura 9: Después de dibujar dos vectores, uno en amarillo y otro en rosa, se aplica la acción de sumar vectores para mostrar el vector resultado en blanco; izquierda, vista frontal y derecha, vista lateral.

Una vez que se ha completado el ejemplo, el usuario puede guardarlo en un fichero para su uso en otra sesión. Para completar el proceso de aprendizaje, el profesor puede dar a los alumnos un ejercicio para resolver, evaluarlo y asignar una nota.

6. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los primeros tests de usabilidad del sistema. En estas pruebas participaron 12 personas con un promedio de edad de 26 años, que estudian en diferentes programas de posgrado de la Universidad Politécnica de Valencia. De los 12 usuarios encuestados, 7 son hombres y 5 son mujeres.

El sistema se ha probado con usuarios no acostumbrados a trabajar con aplicaciones de RA. De los 12 usuarios 5 habían oído hablar de esta tecnología y 7 de ellos desconocían totalmente su existencia. Previo a la experimentación, los usuarios recibieron una plática de introducción de aproximadamente 10 minutos. En esta charla se les explicó el objetivo de las pruebas y el funcionamiento básico del sistema. Se les hizo una demostración de las funcionalidades de la herramienta y se les explicó

las tareas a realizar. El experimento consistió en una serie de 5 ejercicios en los que los usuarios debían alcanzar ciertas metas. Los ejercicios incluyeron las acciones básicas dentro del sistema: cambiar entre una escena y otra, dibujar primitivas, borrar primitivas, aplicar transformaciones y seleccionar elementos simulando el clic sobre los marcadores. Después de 25 minutos en promedio trabajando con el sistema, se les pasó un cuestionario sobre su experiencia.

De acuerdo con las encuestas realizadas, a los usuarios les resultó más fácil manipular las herramientas del sistema cuando se encontraban detrás de la cámara, preferentemente del lado de la mano con la que el usuario escribe.

Respecto a las cuestiones de usabilidad del sistema, 8 de los 12 usuarios encuestados, encontraron fácil o muy fácil utilizar las herramientas del sistema para interactuar con las primitivas dibujadas en la escena. También la misma cantidad de usuarios encontró igualmente fácil la simulación del clic sobre los marcadores para confirmar la realización de una escena. Solo una de las 12 personas encuestadas demostró cierto disgusto por la manera en como el sistema relaciona cada escena con un par de marcadores. De acuerdo a esta persona, resultaría más fácil si no hubiera que cambiar de marcadores para trabajar con una escena diferente.

Otro aspecto del sistema que recibió elogios fue el módulo de autoevaluación, ya que a todos los usuarios les pareció fácil o muy fácil la manera de resolver los ejercicios presentados.

Las conclusiones preliminares que se pueden extraer de dichos cuestionarios son que a la mayoría de los usuarios que probaron el sistema les pareció una idea novedosa. Así, dichos usuarios creen que el uso del sistema facilita el aprendizaje y la mayoría usaría el sistema si tuvieran que estudiar los conceptos tratados en él. También se ha llegado a la conclusión de que hay que mejorar la robustez del sistema frente a los cambios de iluminación.

7. Conclusiones y trabajo futuro

Se ha presentado un sistema de RA para la enseñanza de geometría como un ejemplo de la aplicación de esta tecnología en el campo educativo. Hemos presentado una versión funcional del sistema, pero se han detectado áreas susceptibles de mejora. Se ha probado el sistema con usuarios y se han presentado los resultados de dichos tests de usabilidad.

De los resultados se puede deducir el impacto que tiene la RA sobre los alumnos, como elemento motivador y como herramienta para mejorar la comprensión de ciertos conceptos, que es uno de los objetivos principales del desarrollo de la herramienta. En general, se obtuvo una buena aceptación del sistema, incluso en aquellos usuarios que nunca habían oído hablar de Realidad Aumentada.

Con respecto a las mejoras que se pretenden introducir a corto plazo, cabe mencionar la introducción del módulo de reconocimiento de comandos por voz para la simplificación de la interacción del usuario con el sistema. Este nuevo módulo contemplaría comandos simples para algunas tareas como: guardar una escena, borrar primitivas o resolver un ejercicio por citar algunos ejemplos.

Para dotar al sistema de mayor flexibilidad y facilitar al usuario la generación de escenas se piensa desarrollar una herramienta de autor que facilite al profesor la creación de las escenas. Por otro lado, también se hace necesaria la evaluación más profunda del sistema involucrando más alumnos y profesores.

Se ha planeado usar la aplicación como herramienta didáctica en las asignaturas básicas de introducción a los gráficos por computador de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de la Universidad Politécnica de Valencia. Se evaluarán aspectos de usabilidad y diseño de la aplicación para validar si el sistema logra su propósito pedagógico. Se evaluará si la herramienta ayuda a los estudiantes a comprender mejor conceptos como las transformaciones, al mismo tiempo que se convierte en una herramienta accesible y fácil de usar para el profesor.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido parcialmente patrocinada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México como parte del Programa Especial de Ciencia y Tecnología.

Quisiéramos agradecer también a las personas que han participado desinteresadamente en las pruebas al sistema.