



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

Tesis Doctoral

**Resumen: Aplicación de la Visión por Computador
a la docencia de Física**

Presentado por

D. Rafael Moreno Cano

Directores

Dr. Álvaro Page Del Pozo
Dr. Jaime Riera Guasp

Valencia, Octubre de 2015

Resumen

En esta tesis se desarrolla y valida un nuevo enfoque, basado en el vídeoanálisis, para la docencia de la dinámica en los primeros cursos universitarios de Física. En lugar de usar los planteamientos tradicionales, basados en contrastar la trayectoria medida, $\vec{r}(t)$, con la asociada a un modelo predeterminado, se analiza directamente la relación entre las variables que definen la dinámica del sistema, esto es, la relación entre posición, velocidad y aceleración. De esta manera se puede contrastar la ecuación diferencial que regula la dinámica del movimiento, lo que ofrece una visión diferente de los problemas.

Entre otras ventajas, este enfoque simplifica la explicación de los fenómenos, ya que sólo es necesario describir la ecuación de la dinámica sin necesidad de integrarla. Esto resulta mucho más simple para los alumnos y permite analizar, además, sistemas dinámicos más interesantes que no se suelen estudiar en los primeros cursos. Por otra parte, en este planteamiento se introducen herramientas como los diagramas en el espacio de fases, que facilitan la interpretación de la evolución de un sistema de una manera gráfica e intuitiva para los alumnos. Finalmente, las ecuaciones de la dinámica son mucho más sensibles a las desviaciones entre el modelo y la realidad que sus integrales. De esta manera, los alumnos pueden comprobar la validez de determinadas hipótesis como la linealidad o la ausencia de rozamiento, aspecto fundamental cuando se analizan movimientos reales.

Para poder aplicar este planteamiento, se ha desarrollado un sistema de visión por computador adaptado a las necesidades de un laboratorio docente de Física, pero con las prestaciones propias de uno de investigación. Se han analizado las limitaciones de los actuales sistemas docentes de vídeoanálisis y se han resuelto los principales problemas relacionados con la configuración de las cámaras, su calibración, la digitalización automática y la precisión en la captura de movimientos. Como resultado de este desarrollo, se dispone de un sistema de visión automático, muy preciso y compatible tanto con cámaras de bajo coste como con las de altas prestaciones.

El sistema de captura y análisis de movimientos se complementa con unos algoritmos de suavizado y derivación numérica que permiten calcular las velocidades y aceleraciones de forma muy precisa. El sistema conjunto (captura de movimientos más suavizado), ha sido validado en una serie de experimentos. Su precisión es del orden del 0.1 % en la medición de posiciones, del 0.5 % para las velocidades y del 2 % para las aceleraciones, incluso trabajando con cámaras web de muy bajo coste. Ningún equipo de laboratorio docente puede medir de forma continua y simultánea las magnitudes cinemáticas con tanta precisión y a tan bajo coste.

Para ilustrar las posibilidades de este nuevo enfoque, se han diseñado cinco prácticas de dinámica mediante vídeoanálisis, cubriendo aspectos como la cinemática del punto y del sólido, las oscilaciones no lineales, los sistemas con equilibrio dinámico, los sistemas de masa variable o la dinámica del sólido rígido.

Finalmente se ha evaluado la mejora en el rendimiento de los alumnos asociada a este tipo de experiencias. Para ello se ha realizado un estudio de validación en el que han participado 152 alumnos de tres titulaciones de grados en Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia. Los resultados del estudio muestran mejoras muy significativas en la comprensión de los conceptos de la dinámica en el grupo de alumnos que realizó prácticas de laboratorio con la nueva metodología docente, frente al grupo de control.

Aunque el desarrollo de las nuevas prácticas se ha centrado en la materia de Física de primer curso, los equipos y el software desarrollados pueden ser aplicados en estudios experimentales de materias más especializadas, como la Mecánica, Teoría de Máquinas, Estructuras, Dinámica de fluidos, Biomecánica y, en general, en cualquier tipo de experiencia donde deban cuantificarse con precisión las relaciones entre las variables de posición y sus derivadas.

Resum

En aquesta tesi es desenvolupa i valida un nou enfocament, basat en el vídeo-anàlisi, per a la docència de la dinàmica en els primers cursos universitaris de Física. En compte d'usar els plantejaments tradicionals, basats en contrastar la trajectòria mesurat, $\vec{r}(t)$, amb la associat a un model predeterminat, s'analitza directament la relació entre les variables que defineixen la dinàmica del sistema, açò és, la relació entre posició, velocitat i acceleració. D'aquesta manera es pot contrastar l'equació diferencial que regula la dinàmica del moviment, la qual cosa ofereix una visió diferent dels problemes.

Entre altres avantatges, aquest enfocament simplifica l'explicació dels fenòmens, ja que només és necessari descriure l'equació de la dinàmica sense necessitat d'integrar-la. Açò resulta molt més simple per als alumnes i permet analitzar, a més, sistemes dinàmics més interessants que no se solen estudiar en els primers cursos. D'altra banda, en aquest plantejament s'introdueixen ferramentes com els diagrames en l'espai de fases, que faciliten la interpretació de l'evolució d'un sistema d'una manera gràfica. Finalment, les equacions de la dinàmica són molt més sensibles a les desviacions entre el model i la realitat que els seus integrals. D'aquesta manera, els alumnes poden comprovar la validesa de determinades hipòtesis, com la linealitat o l'absència de fregament.

Per a poder aplicar aquest plantejament, s'ha desenvolupat un sistema de visió per computador adaptat a les necessitats d'un laboratori docent de Física, però amb les prestacions pròpies d'un d'investigació. S'han analitzat les limitacions dels actuals sistemes docents de vídeo-anàlisi i s'han resolt els principals problemes relacionats amb la configuració de les càmeres, el seu calibratge, la digitalització automàtica i la precisió en la captura de moviments. Com resultat d'aquest desenvolupament, es disposa d'un sistema de visió automàtic, molt precís i compatible tant amb càmeres de baix cost com amb les d'altres prestacions.

El sistema de captura i anàlisi de moviments es complementa amb uns algorismes de suavitzat i derivació numèrica que permeten calcular les velocitats i acceleracions de forma molt precisa. El sistema conjunt (captura de moviments més suavitzat), ha sigut validat en una sèrie d'experiments. La seua precisió és de l'orde del 0.1 % en el mesurament de posicions, del 0.5 % per a les velocitats i del 2 % per a les acceleracions, inclús treballant amb càmeres web de molt baix cost. Cap equip de laboratori docent pot mesurar de forma contínua i simultània les magnituds cinemàtiques amb tanta precisió i a tan baix cost.

Per a il·lustrar les possibilitats d'aquest nou enfocament, s'han dissenyat cinc pràctiques de dinàmica mitjançant vídeo-anàlisi, cobrint aspectes com la cinemàtica del punt i del sòlid, les oscil·lacions no lineals, els sistemes amb equilibri dinàmic, els sistemes de massa variable o la dinàmica del sòlid rígid.

Finalment s'ha avaluat la millora en el rendiment dels alumnes associada a aquest tipus d'experiències. Per a això s'ha realitzat un estudi de validació en què han participat 152 alumnes de tres titulacions de grau en Enginyeria de la Universitat Politècnica de València. Els resultats de l'estudi mostren millores molt significatives en la comprensió dels conceptes de la dinàmica en el grup d'alumnes que va realitzar pràctiques de laboratori amb la nova metodologia d'ensenyança, enfront del grup de control.

Encara que el desenvolupament de les noves pràctiques s'ha centrat en la matèria de Física de primer curs, els equips i el programari poden ser aplicats en estudis experimentals de matèries més especialitzades, com la Mecànica, Teoria de Màquines, Estructures, Dinàmica de fluids, Biomecànica i, en general, en qualsevol tipus d'experiència on hagen de quantificar-se amb precisió les relacions entre les variables de posició i les seues derivades.

Abstract

This thesis presents, develops and validates a new methodology based on video analysis for the lessons related to dynamics during the first Physics courses at Universities. Instead of applying traditional approaches based on comparing the measured trajectory, $\vec{r}(t)$, with such associated to a determined model, in this thesis it is proposed to analyze directly the relation among the variables which define the dynamics of the system, i.e. the relation among position, speed and acceleration. In this way, it is possible to compare the differential equation that regulates the dynamic of the movement, providing a different perspective on the problems.

Among others, one major advantage of the proposed approach is to ease the explanation of some phenomena because it is only necessary to describe the equation of the dynamics but without the requirement of its integration. This is considerable simpler for the students and lets them analyze other interesting dynamic systems which are not used to be studied during the first courses at University. On the other hand, this approach presents some tools, like the diagrams in the phases space, which ease the graphic interpretation of system evolution. Finally, the equations of the dynamics are quite more sensitive to the deviations between the model and the reality of its integrals. Thus, the students can assess and validate some hypotheses like the linearity or the absence of friction.

In order to apply this approach, a computer vision system is developed and adapted to the requirements of a teaching lab of physics, but with the same performance as a research lab. The main limitations of current teaching systems of video analysis are identified, and the main problems related to the configuration of the cameras, their calibration, the automatic digitalization and the accuracy in the movement acquisition are solved. A result of this development is an automatic computer vision system of high precision and interoperability with both cameras of low cost and a more sophisticated performance.

The video acquisition system and the movement analysis integrate some specific algorithms for smoothing and numeric derivation. These algorithms are used to calculate accurately speed and acceleration of a movement. The final system (providing a smoother capture of movements) is validated through some experiments. The accuracy in position measuring is about 0.1 %, 0.5 % for speed and 2 % for acceleration, even though using web cameras of very low cost. Nowadays, there is not any teaching lab equipment able to measure continuously and simultaneously these cinematic magnitudes with so high accuracy while being so cheap.

In order to show the multitude of possibilities that are offered by this new approach, five practices of dynamics using this video analysis system are designed, covering aspects like the cinematic of the point and the solid, the non linear oscillations, the systems with dynamic balance, the systems with variable mass or the dynamic of rigid solid.

Finally, the improvement in the student performance associated to this kind of experiences is evaluated. For this, a validation study is carried out using the participation of 152 students coming from three different bachelor degrees of Engineering in the Polit cnica University of Valencia. The results of this study show relevant improvements in the understanding of dynamics concepts in such students who carried out their lab practices using the new methodology in comparison with the control student team.

Although the development of new practices has been focused on the first courses of Physics degree, the proposed equipment and software can be applied in other experimental studies like Mechanic, Theory of machines, Structures, Dynamic of fluid, Biomechanic and, in general, in any kind of experience where it may be necessary to measure accurately the relation between position and its derivatives.