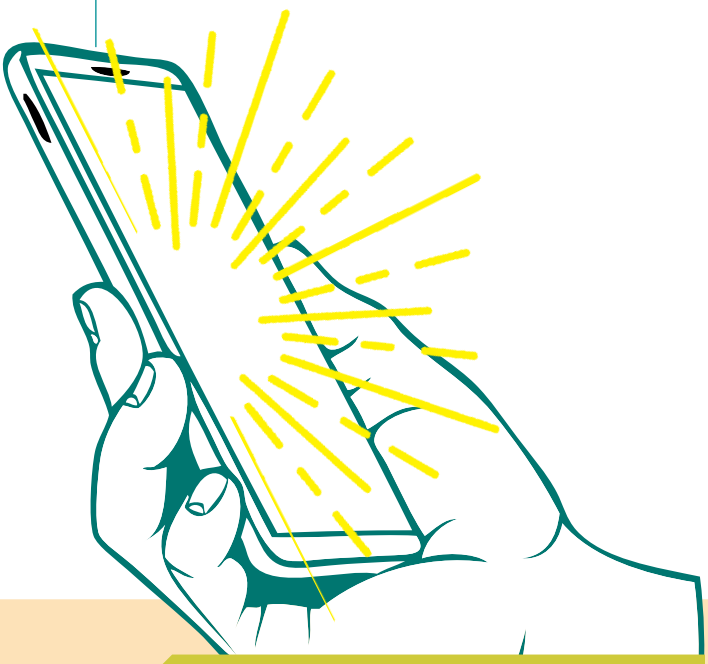


مطالعهٔ پرتوهای نور با تلفن هوشمند

نوشته: آنتونی ژیرو و همکاران
مترجمان: محمدرضا مبارکی، هیوا احمدی‌نیا و عزیز خدادادی

اشاره

امروزه بیش از دو میلیارد نفر از مردم جهان دارای تلفن هوشمند هستند، اما اکثر آن‌ها نمی‌دانند که از موبایل خود می‌توانند به‌عنوان یک آزمایشگاه فیزیک برای مطالعه آکوستیک، مکانیک، نجوم، نورشناخت، مکانیک سیالات و یا حتی به‌عنوان یک برق‌نما استفاده کنند. تمامی تلفن‌های هوشمند حداقل یک دوربین دارند که احتمالاً مشهورترین حسگر شناخته شده و به‌کار رفته در این دستگاه است. همین دوربین به ما علاوه بر عکس‌برداری و فیلم‌برداری امکان اسکن کدهای QR و غیره را نیز می‌دهد. در این مقاله نحوه مطالعه پرتوهای نوری ساده را با استفاده از تلفن‌های هوشمند و چگونگی تعیین فاصله کانونی دوربین آن‌ها نشان می‌دهیم که می‌تواند یک روش تعاملی جالب برای معرفی مفاهیم پرتوهای نور باشد.

پیش‌زمینه

دوربین تلفن هوشمند با یک عدسی همگرا کار می‌کند. این عدسی تصویر A'B' از شیء AB را، همان‌طور که در شکل ۱ ترسیم شده است، بر روی حسگر CCD (یا CMOS) تشکیل می‌دهد. ساختار پرتوهای نوری به ما امکان تعیین اندازه این تصویر بر روی حسگر را می‌دهد. پرتو نوری که از نقطهٔ B در امتداد مرکز عدسی O تابش می‌شود منحرف نمی‌شود. در نتیجه تصویر A'B' بر روی حسگر به‌صورت معکوس تشکیل می‌شود. بر این اساس همه پرتوهای تابش شده به‌صورت موازی و نزدیک به محور اصلی عدسی توسط عدسی شکسته شده و پرتوهای خارج شده محور را در نقطهٔ کانونی F' قطع می‌کنند (شکل ۱ را ببینید). فاصلهٔ بین مرکز عدسی O و نقطه کانونی F'، فاصلهٔ کانونی f' نامیده می‌شود که نشان‌دهنده توان همگرایی نور است و یکی از ویژگی‌های مهم دوربین به شمار می‌رود. در عکاسی، فاصلهٔ کانونی کم منجر به ایجاد میدان دید گسترده‌تر با بزرگ‌نمایی کوچک‌تر می‌شود. در حالی‌که فاصله کانونی زیاد منجر به میدان دید باریک‌تر با بزرگ‌نمایی بیشتر می‌شود. فاصله کانونی دوربین تلفن هوشمند شما را شرکت سازنده تعیین کرده است و شما می‌توانید ویژگی‌های آن را در اینترنت بیابید.

در مورد عدسی‌های نازک، اندازهٔ جبری فاصلهٔ عدسی از شیء $\overline{OA}$ با اندازهٔ جبری فاصله عدسی از تصویر $\overline{OA'}$ و فاصله کانونی f' مرتبط است (برای عدسی همگرا $f'>0$):

(۱)
$$\frac{1}{\overline{OA'}}-\frac{1}{\overline{OA}}=\frac{1}{f'}$$

که همان قانون کلاسیک دکارت است. بنابراین اگر مکان شیء و فاصلهٔ کانونی عدسی را بدانید این رابطه مکان تصویر را به شما می‌دهد.

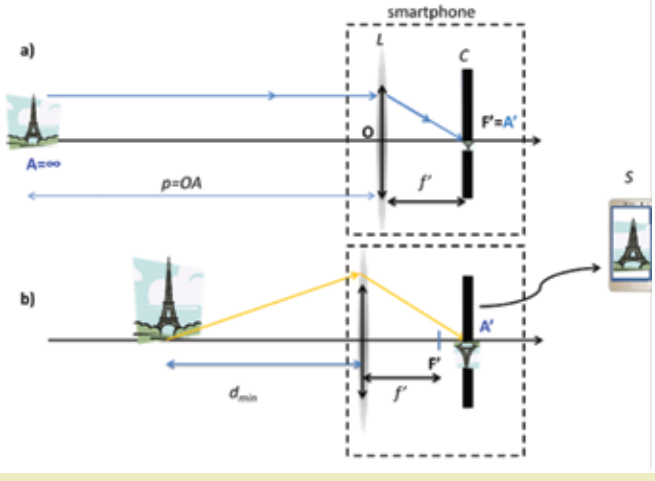
برای یک شیء واقع در بی‌نهایت (یعنی در فاصله‌ای بسیار دورتر از فاصله کانونی عدسی)، تصویر A'B' در صفحه کانونی تشکیل می‌شود یعنی در فاصله کانونی f' از عدسی ($\overline{OA'}=f'$). برای تلفن هوشمند به‌کار رفته در این آزمایش (آیفون ۴s)، f' برابر است با ۴/۲۸mm لذا $\overline{OA'}=4/28\,mm$ [شکل ۱ (الف)]. حال اگر شیئی را در نظر بگیریم که در نزدیک‌ترین مکان ممکن (حداقل فاصله کاربردی) از تلفن هوشمند قرار دارد، درخصوص آزمایش ما $\overline{OA}=-6/5\,cm$، با استفاده از معادله (۱)، $\overline{OA'}=4/58\,mm$ [شکل ۱ (ب)]. این بدان معناست که برای تشکیل تصویر بر روی حسگر دوربین بایستی عدسی روی محور خود به مقدار کمی جابه‌جا شود. این امر اساس طرز کار فوکوس خودکار در دوربین تلفن‌های هوشمند است.

رابطه مهم دیگر بزرگ‌نمایی γ است که طول تصویر $\overline{A'B'}$ بر روی حسگر و طول شیء $\overline{AB}$ را به هم مرتبط می‌کند:

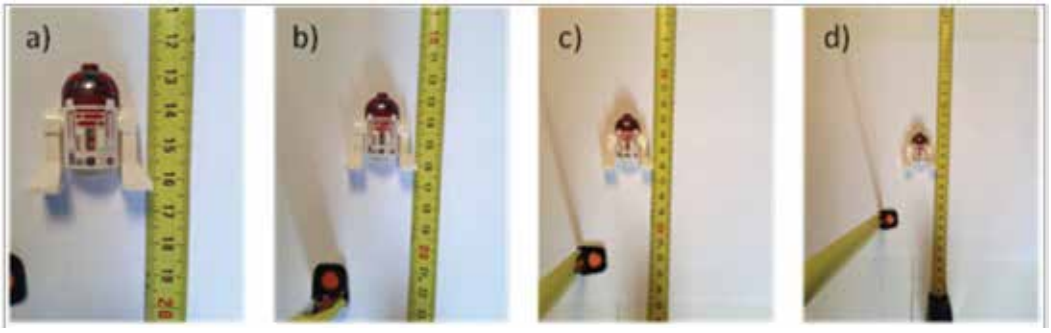
(۲)
$$\gamma=\frac{\overline{A'B'}}{\overline{AB}}=\frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

اگر اندازهٔ تصویر بزرگ‌تر از اندازهٔ شیء باشد، بزرگ‌نمایی بیشتر از ۱ است و اگر تصویر نسبت به جسم وارونه باشد که در گوشی‌های هوشمند چنین است، γ منفی است. در این

در عکاسی، فاصلهٔ کانونی کم منجر به ایجاد میدان دید گسترده‌تر با بزرگ‌نمایی کوچک‌تر می‌شود. در حالی‌که فاصله کانونی زیاد منجر به میدان دید باریک‌تر با بزرگ‌نمایی بیشتر می‌شود



▲ شکل ۱. طرح ساده‌ای از نورشناسی با تلفن هوشمند در دو حالت:
الف. شیء در بی‌نهایت قرار دارد و تصویر در سطح کانونی عدسی (L) بر روی حسگر (CMOS) C تشکیل می‌شود.
ب. برای نزدیک‌ترین فاصله شیء (حداقل فاصله کاربردی)، تصویر در فاصله دورتر از کانون تشکیل می‌شود. در نتیجه تصویر بر روی صفحه نمایش تلفن هوشمند با یک ضریب تبدیل بزرگ‌تر می‌شود. برای آیفون ۴s، ۲۸mm/۴=f' و ۵cm/۶=dmin.



شکل ۲. نمونه تصاویر شیئی که در فواصل مختلف OA از یک تلفن هوشمند بر روی کف زمین قرار گرفته. متر نواری که در سمت چپ و پایین تصویر قرار گرفته امکان اندازه‌گیری فاصله بین شیء و تلفن هوشمند را به ما می‌دهد در حالی که متر نواری قرار گرفته در سمت راست شیء ما را قادر می‌سازد تا اندازه شیء را به دست آوریم.

عدسی دوربین تلفن هوشمند تصویری معکوس و چند میلی‌متری بر روی حسگر تشکیل می‌دهد. تصویر نمایش داده شده بر روی صفحه نمایش تلفن هوشمند خیلی بزرگ‌تر از تصویر ایجاد شده بر روی حسگر است

مقاله نشـــان خواهیم داد که چگونه می‌توان از معادلات (۱) و (۲) به ســـادگی فاصله کانونی دوربین تلفن هوشمند را به دســـت آورد. با استفاده از معادله‌های (۱) و (۲) به سادگی به دست می‌آوریم:

$$\frac{1}{\gamma} = 1 + \frac{1}{f'}\overline{OA} \qquad (۳)$$

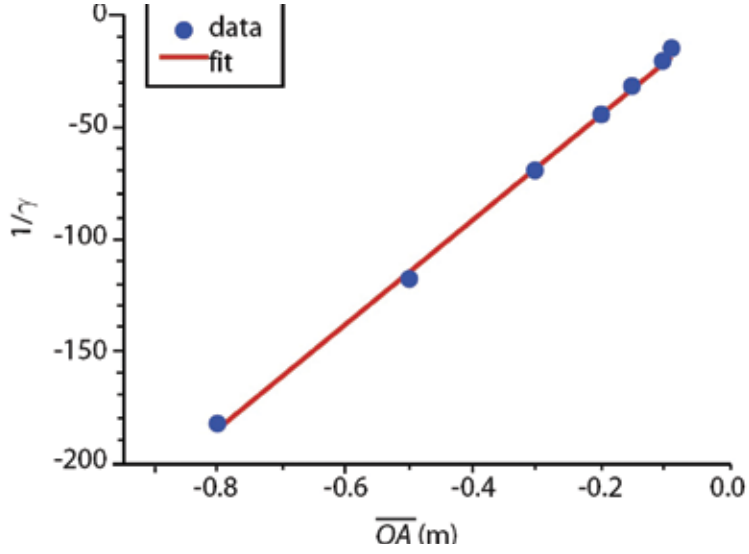
آزمایش

همان‌طور که قبلاً دیدیم، عدســـی دوربین تلفن هوشمند تصویری معکوس و چند میلی‌متری بر روی حســـگر تشکیل می‌دهد. تصویر نمایش داده شـــده بـــر روی صفحه نمایش تلفن هوشـــمند خیلی بزرگ‌تر از تصویر ایجاد شـــده بر روی حسگر اســـت؛ یعنی یک عملیات عددی برای بزرگ کردن آن وجود دارد. اول از همه لازم اســـت ضریب بزرگ‌نمایی γ_1 را که بین حســـگر CMOS و صفحه نمایش تلفن هوشمند وجود دارد و به نسبت بین آن‌ها بستگی دارد (اندازه حسگر و صفحه نمایش به راحتی در اینترنت یافت می‌شود) به دست آوریم. اندازهٔ حسگر CMOS و صفحه نمایش تلفن هوشمند به‌کار رفته در این آزمایش (آیفون ۴s) به ترتیب برابر اســـت با $w \times l = 3/42\,mm \times 4/54\,mm$ و $W \times L = 50\,mm \times 75\,mm$. پس ضریب بزرگ‌نمایی برابر است با $\gamma_1 = L/l = -16/5$. بنابراین تصویر ایجاد شده بر روی صفحه نمایش ۱۶/۵ برابر بزرگ‌تر از تصویر ایجاد شـــده بر روی حســـگر دوربین است (اگر در امتداد عرض تلفن هوشـــمند به صفحه نمایش نگاه کنیم، $y_1 = W/l = -11/0$). علامت منفی به وضوح نشان می‌دهد که تصویر برای نمایش صحیح در صفحه نمایش شما معکوس شده است.

روش اندازه‌گیری فاصله کانونی تلفن هوشـــمند ما براساس معادلات مربوط به عدسی و بزرگ‌نمایی است [معادلات (۱) و (۲)]. آزمایش شامل گرفتن عکس‌هایی با تلفن هوشمندمان از شـــیئی با اندازه مشخص $\overline{AB}$ است که در فواصل مختلف OA از تلفن هوشمند قرار دارد. در اینجا ما فاصلهٔ بین شیء و عدســـی را تقریباً با فاصلهٔ بین شیء و تلفن هوشمند برابر می‌گیریم. این تقریب فقط برای شیئی معتبر است که خیلی به تلفن هوشـــمند نزدیک نباشد. سپس می‌توانیم به راحتی اندازه تصویر $\overline{A_1B_1}$ را، که بـــرای فواصل مختلف بین تلفن هوشـــمند و شیء OA بر روی صفحه نمایش تلفن هوشمند نمایش داده می‌شود، تعیین کنیم (شکل ۲ را ببینید). با تعیین $\overline{A_1B_1}$ و داشتن ضریب تبدیل صفحه نمایش γ_1 که برابر است با $\overline{A_1B_1}/\overline{A'B'}$، می‌توانیم اندازه واقعی تصویر $\overline{A'B'}$ تشکیل شـــده بر روی حســـگر CMOS دوربین را به دست آوریم. در نهایـــت بزرگ‌نمایی $\gamma = A'B'/AB$ را، که عدســـی برای مکان‌های مختلف OA ایجاد می‌کند، با استفاده از معادله (۲) حساب می‌کنیم.

نتایج

شـــکل ۲ نمونـــه تصاویری را نشـــان می‌دهد کـــه با تلفن هوشمند از یک شـــیء در فواصل مختلف $\overline{OA}$ گرفته شده است. با اســـتفاده از یک خط‌کش ساده اندازهٔ واقعی شیء را تعییـــن کردیم. برای ایجاد تصویر واضـــح در فواصل نزدیک $\overline{OA}$ ما AB=۴cm را به‌کار بردیم [شکل ۲ (الف) را ببینید!] در حالی‌کـــه برای فواصـــل دورتر $\overline{OA}$ ما $\overline{AB} = 10\,cm$ را به‌کار بردیم (جدول ۱ را ببینید). برای این آزمایش در امتداد طول صفحه نمایش تلفن هوشمند خود به صفحه نمایش نگاه



▲ شکل ۳. معکوس ضریب بزرگ‌نمایی برحسب اندازه جبری فاصله بین شیء و عدسی. معادله برازش به‌صورت y=۱+(۱-۶m/۲۳۱)x است. شیب معادله برابر است با معکوس فاصله کانونی [معادله (۳) را ببینید!].

در شکل ۳ براساس معادله (۳) معکوس بزرگ‌نمایی $\frac{۱}{\gamma}$ را برحسب مکان $\overline{OA}$ رسم کرده‌ایم و خطی به دست آورده‌ایم که با نظریه مطابقت خوبی دارد

کردیم. بنابراین $\gamma_۱ = -۱۶/۵$، تمام نتایج تجربی در جدول ۱ خلاصه شده است.

در شکل ۳ براساس معادله (۳) معکوس بزرگ‌نمایی $\frac{۱}{\gamma}$ را برحسب مکان $\overline{OA}$ رسم کرده‌ایم و خطی به دست آورده‌ایم که با نظریه مطابقت خوبی دارد.

خط برازش شده با معادله خطی با شیب $a = ۱/f'$ و عرض از مبدأ ۱ مطابقت دارد. با برازش منحنی تجربی‌مان شیب را برابر $۲۳۱/۶\,m^{-۱}$ به دست آوردیم. در نهایت نتیجه گرفتیم که فاصلهٔ کانونی تلفن هوشمندمان برابر است با $f'=۱/a=۴/۳۱\,mm$. این مقدار تجربی ۱۰ درصد با فاصله کانونی داده شده توسط شرکت سازنده یعنی $f'=۴/۲۸\,mm$ اختلاف دارد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله آزمایش ساده‌ای را برای تعیین فاصله کانونی دوربین یک تلفن هوشمند نشان دادیم. به‌کار بردن مفاهیم این آزمایش در یکی از وسایل زندگی روزمرهٔ دانش‌آموزان می‌تواند ابزار آموزشی جالبی جهت معرفی پرتوهای نور و عدسی‌های نازک برای آن‌ها باشد.

جدول ۱. اندازه‌های شیء و تصویر برای فواصل مختلف p=OA

بزرگنمایی عدسی γ	اندازهٔ تصویر بر روی حسگر $\overline{A'B'}$(cm)	اندازهٔ تصویر بر روی صفحه نمایش $\overline{A'B'}$(cm)	فاصله بین شیء و تلفن هوشمند $\overline{OA}$(cm)	اندازه شیء $\overline{AB}$(cm)
-۰/۰۶۸	-۰/۲۷۱	۴/۵	-۹	۴
-۰/۰۵۰	-۰/۲۰۰	۲/۵	-۱۰	۴
-۰/۰۳۱	-۰/۳۰۹	۵/۱	-۱۵	۱۰
-۰/۰۲۲	-۰/۲۲۱	۳/۶	-۲۰	۱۰
-۰/۰۱۴۵	-۰/۱۴۵	۲/۴	-۳۰	۱۰
-۰/۰۰۸۵	-۰/۰۸۵	۱/۴	۵۰	۱۰
-۰/۰۰۵۵	-۰/۰۵۵	۰/۹	-۸۰	۱۰

مرجع
Phys. Teach. 58, 133 (2020) by Antoine Girot, Nicolas-Alexandre Goy, Alexandre Vilquin, and Ulysse Delabre.