



بهبود دقیق زمانی روش درجه‌بندی تصویر-پایه انبرک نوری

لیلا آزادی^۱ و سیدنادر سیدریحانی^۲

^۱ گروه فیزیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، جاده گوازنگ، زنجان

^۲ دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چکیده - انبرک نوری ابزاری مفید جهت تлемاندازی ذراتی در مقیاس نانومتر تا میکرومتر است. این وسیله می‌تواند نیروهایی از مرتبه فوتونیوتون تا نانوئیوتون به ذرهی به تله افتاده وارد کند. برای استفاده از انبرک نوری باید آن را قبل از استفاده درجه‌بندی کرد. آشکارسازی با فوتودیود، معمول ترین روش درجه‌بندی است، پاسخ غیرخطی آشکارساز برای جابجایی‌های بزرگ ذره درون تله مشکل اصلی این روش است. روش ویدئومیکروسکوپی یک روش دیگر درجه‌بندی است که در آن از تصویر ذرهی به تله افتاده برای درجه‌بندی استفاده می‌شود. مشکل اصلی این روش، محدودیت تفکیک زمانی دوربین مورد استفاده برای تصویربرداری است. در این مقاله، نشان داده شده است که ثبت فقط نوار باریکی از تصویر ذره توسط دوربین سریع می‌تواند تا حدود قابل توجهی به این مسئله فائق آید.

کلید واژه - انبرک نوری، درجه‌بندی، دوربین سریع، فوتودیود، ویدئومیکروسکوپی.

Improving temporal resolution of image-based calibration of Optical Tweezers

Leila Azadi¹, Seyed Nader Seyed Reihani²

¹ Department of Physics, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, Zanjan

² Department of Physics, Sharif University of Technology, Tehran

Abstract- Optical Tweezers are useful tools for trapping particles with sizes from nanometer to micrometer. This tool can exert forces in the range of femto to nano Newtons to the trapped object. Optical Tweezers have to be calibrated prior to use. Photo-diode detection scheme is the most common calibration method of optical tweezers. This method suffers from nonlinear response for large displacements of the trapped bead. Video-Microscopy is known as another calibration method in which the image of the trapped particle is used for calibration. The main disadvantage of the current method is the limited temporal resolution of the recording camera. In this paper it is shown that recording only a narrow strip of the particle's image recorded by a fast camera could significantly overcome this limitation of the current calibration method.

Keywords: Optical Tweezers, Calibration, high speed Camera, Photo-Diode, Video-Microscopy

تله دسترسی داشت.

۳. درجه‌بندی انبرک‌نوری

هر اندازه‌گیری در فیزیک نیاز به ابزار اندازه‌گیری دارد و هر ابزار اندازه‌گیری نیز نیازمند درجه‌بندی است. معنی و مفهوم درجه‌بندی انبرک‌نوری چیزی جز به دست آوردن سختی تله نیست، با به دست آوردن سختی تله به راحتی می‌توان به اندازه‌ی نیروی تله دسترسی داشت.

۱-۳ درجه‌بندی به روش طیف توانی

درجه‌بندی به کار رفته در این مقاله، درجه‌بندی به روش طیف توانی می‌باشد. نیروی اعمال شده بر یک ذره در انبرک‌نوری، با برازش یک نمودار لورنتس بر روی نمودار طیف‌توانی مکان ذره درون تله به دست می‌آید [۵].

نظریه‌ی افت و خیز

طبق این نظریه نیروی اعمالی بر یک ذره درون تله با رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$m\ddot{x} = -\gamma\dot{x} - Kx + \eta(x, t) \quad (2)$$

در این معادله که به معادله لانژون معروف است، \dot{x} نیروی مقاومت سیال و γ ضریب مقاومت استوکس، Kx نیروی تله و $\eta(x, t)$ نیروی تصادفی است. روش حل این معادله در نظریه‌ی افت و خیز به این ترتیب است که ابتدا به فضای فوریه‌ی زمانی رفته و با حل معادله لانژون در فضای فوریه و سپس با به دست آوردن قدر مطلق جواب به طیف‌توانی (رابطه‌ی زیر) می‌رسیم.

$$P(f) = \frac{K_B T}{\gamma\pi^2(f^2 + f_c^2)} \quad (3)$$

در این رابطه، $P(f)$ طیف‌توانی، K_B ثابت بولتزمن T دما و f_c فرکانس گوشه می‌باشد، با توجه به رابطه:

$$f_c = \frac{K}{2\pi\gamma} \quad (4)$$

در صورت دسترسی به فرکانس گوشه به K (سختی تله) نیز خواهیم رسید.

۴. دوربین سریع

مشکل اصلی فوتودیود باعث گزینش روش ویدئو میکروسکوپی در این مقاله، جهت آشکارسازی شده است.

۱. مقدمه

آرتوور اشکین در سال ۱۹۷۰ در مقاله‌ای با عنوان شتاب و به دام انداختن ذرات به وسیله‌ی فشارتابشی، نشان داد که تکانه‌ی فوتون می‌تواند به ذرات منتقل شود، و با انتقال تکانه یا فشارتابشی می‌توان ذرات را به دام انداخت [۱]. امروزه تله‌اندازی ذرات توسط انبرک‌نوری انجام می‌گیرد. انبرک‌نوری، باریکه‌ی لیزر با نمایه‌ی گاوی TEM_{00} است که توسط یک عدسی شیئی کانونی می‌شود. انتقال تکانه به ذره در دو جهت محوری و عمود بر راستای محور اتفاق می‌افتد، که منجر به وارد شدن دو نوع نیرو به ذره می‌شود که به ترتیب به نیروی پراکنده‌ی و نیروی گردانی شهرت پیدا کرده‌اند. نیروی تله کاملاً شبیه به نیروی فنر است و رابطه‌ی حاکم بر آن طبق قانون هوک برابر است با:

$$F = -Kx \quad (1)$$

که در آن x موقعیت ذره نسبت به محل تعادل ($x=0$) و K سختی تله است [۲].

۲. ابزار آشکارسازی در انبرک‌نوری

اندازه‌گیری دقیق مکان ذرات در انبرک‌نوری نیازمند ابزار آشکارسازی مکان است که عبارتند از:

۲-۱ آشکارسازی با فوتودیود چهارتایی

پرکاربردترین ابزار آشکارسازی در انبرک‌نوری فوتودیود است. فوتودیود چهارتایی، چهار کاتد است که روی یک آند سوار شده است. نور عبوری از ذره پس از جمع شدن توسط چگالنده به فوتودیود می‌رسد. بعد از برخورد نور به فوتودیود، هریک از چهار قسمت به طور مجزا، یک جریان الکتریکی تولید می‌کنند. با جایه‌جایی ذره درون تله، توزیع شدت بر روی چهار قسمت تغییر می‌کند. با ثبت تغییرات ولتاژ مربوط به تغییرات توزیع شدت می‌توان جایه‌جایی ذره درون تله را آشکارسازی کرد [۳][۴].

۲-۲ آشکارسازی به روش ویدئومیکروسکوپی

در این روش آشکارسازی با قرار دادن یک دوربین در درگاه دوربین میکروسکوپ، و با استفاده از یک عدسی شیئی تصویر ذره درون تله ثبت می‌شود. در این روش با آنالیز تصاویر گرفته شده می‌توان به موقعیت ذره درون

نمونه‌ی مورد استفاده میکروکره پلی‌استایرین با قطر ۳/۰۹ میکرومتر در محلول آب بوده است و میکروسکوپ مورد استفاده در آزمایشگاه انبرکنوری، میکروسکوپ وارون است.

فیلمبرداری با کاهش ناحیه‌ی تصویربرداری دوربین

در این مرحله، ناحیه‌ی تصویربرداری دوربین سریع را توسط نرمافزار مربوطه کاهش دادیم. مشخصات فیلم ثبت شده بعد از کاهش ناحیه در جدول ۲ موجود است.

جدول ۲: مشخصات فیلم ثبت شده توسط دوربین سریع کاهش ناحیه‌ی تصویربرداری دوربین سریع.

۲۳۴۰ فریم در ثانیه	آهنگ فریم
۱۰×۷۵۲ پیکسل	اندازه‌ی هر فریم
۳۹۸ مگابایت	حجم
۱۴ ثانیه	مدت زمان فیلم

۲-۵ تحلیل داده‌ها

در این مقاله از نرمافزار MATLAB برای تحلیل داده‌ها استفاده شد، شرح برنامه دارای مراحل زیر است:

بارگذاری فیلم

چون حجم فیلم کاهش داده شد، بارگذاری سریع بوده و زمان زیادی را به خود اختصاص نداد.

پالایش تصویر

تبديل فوريه، حذف فرکانس‌های بالا مربوط به ذرات کوچک (کشیفی‌های موجود در اتاقک نمونه)، و سپس تبدل فوريه معکوس (شکل ۲). با این کار درواقع از فیلتر پایین‌گذر استفاده شده تا تصویری واضح داشته باشیم.



شکل ۲: از بالا، شکل اول: تصویر ذره درون تله، شکل دوم: تصویر ذره بعد از تبدیل فوریه معکوس.

دو مقداری کردن

در نرمافزار مورد استفاده، هر عکس یک ماتریس سه

در روش ویدئو میکروسکوپی نیز، از دوربین سریع برای حل مشکل پایین بودن سرعت عکس‌برداری استفاده شده است. دوربین‌های سریع به علت اشغال حجم زیادی از حافظه‌ی کامپیوتر جهت ذخیره‌سازی داده‌ها، مناسب نیستند، مشخصات فیلم ثبت شده توسط دوربین سریع در جدول زیر (جدول ۱) اثباتی بر این گفته است.

جدول ۱: مشخصات فیلم ثبت شده توسط دوربین سریع

۷۱ فریم در یک ثانیه	آهنگ فریم
۴۸۰×۷۵۲ پیکسل	اندازه‌ی هر فریم
۱ گیگابایت	حجم
۴ ۱ ثانیه	مدت زمان فیلم

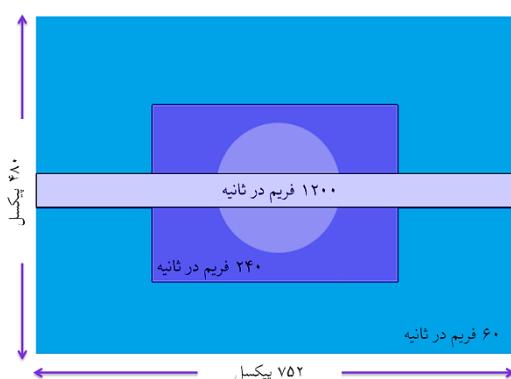
۴-۱ کاهش ناحیه‌ی تصویربرداری دوربین سریع

با وجود محدودیت‌های روش ویدئومیکروسکوپی، در این مقاله به دنبال راه حلی بوده و روش کاهش ناحیه‌ی تصویربرداری دوربین سریع را پیشنهاد کردایم. در این روش با کاهش دادن اندازه‌ی مربوط به هر فریم، طوری که فقط محدوده‌ای که ذره در آن وجود دارد قابل دید باشد(شکل ۱)، می‌توان هم شاهد کاهش حجم و هم افزایش نرخ فریم بود.

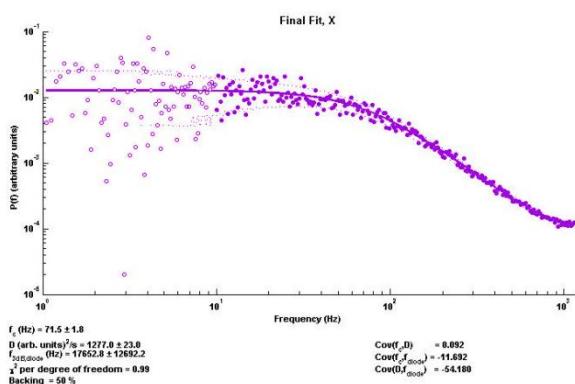
۵. مراحل آزمایش

۱-۵ چیدمان آزمایش

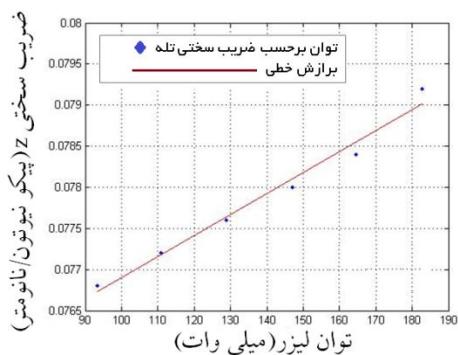
لیزر، نمونه‌ی مورد استفاده، میکروسکوپ لیزر با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر با نمایه‌ی گوسی TEM₀₀ برای تله‌اندازی ذرات استفاده شده است.



شکل ۱: طرح‌واره‌ای از کاهش ناحیه‌ی تصویربرداری دوربین سریع



شکل ۵: نمودار طیف توانی بر حسب فرکانس مربوط به پلی استایرین با قطر $3/0\cdot 9$ میکرومتر، در این آزمایش فرکانس گوشه $71/5$ هرتز و ضریب سختی تله 11 fN/nm بدست آمد.



شکل ۶: نمودار توان لیزر بر حسب سختی تله مربوط به پلی استایرین با قطر $3/0\cdot 9$ میکرومتر.

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله سعی شد با کاهش ناحیه‌ی تصویربرداری دوربین سریع، نرخ فریم را افزایش داده و موازی با آن حجم داده‌ها را نیز کاهش دهیم. با انجام این کار در واقع می‌توان شاهد به روی کار آمدن دوباره‌ی روش ویدئو میکروسکوپی در آشکارسازی انبرک نوری بود.

مراجع

- [1] A. Ashkin, *Phys. Rev. Lett.*, Volume 24, Issue 4 (1970).
- [2] S. N. S. Reihani, H. R. Khalesifard, R. Golestanian, *Opt. Comm.* 259 204-211, (2006).
- [3] F. Gittes, Ch. F. Schmidt: *Opt. Lett.* 231, (1998).
- [4] الهه، یگانگی دستگردی، سیدنادر، سیدریحانی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان، کنفرانس فیزیک، ۱۳۸۸
- [5] Kirstian Berg-Sørensen and Henrik Flyvbjerg: *Rev. Sci. Instrum.*

بعدی است و مفهوم دومقداری کردن عکس در این مرحله، صفر و یک کردن اعداد ماتریس مربوطه است. با این کار مرز بین ذره و محیط اطراف به خوبی قابل تشخیص خواهد بود(شکل ۳).



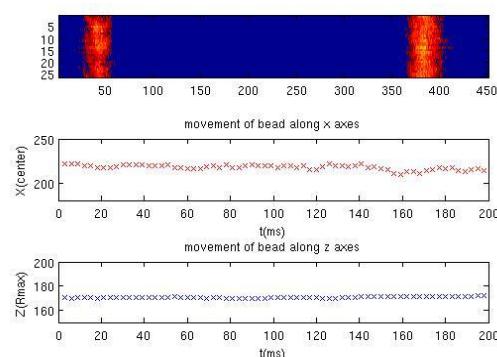
شکل ۳: تصویر ذره بعد از دومقداری کردن.

اندازه‌گیری شعاع و مرکز جرم ذره

با فراخوانی سطحی ماتریس فریم اول تا نصف طول فریم، پیدا کردن شدت کمینه، میانگین‌گیری و تکرار همین کار برای نصف دیگر فریم، می‌توان فاصله‌ی دو شدت در سطر اول را پیدا کرد و با تکرار برای سطوح‌های بعدی و میانگین‌گیری می‌توان شعاع ذره و مرکز آن را پیدا کرد. با تغییر شعاع در فریمه‌ای بعدی سری زمانی تغییرات در راستای z و با تغییر مرکز جرم، سری زمانی مربوط به تغییرات در راستای x را به دست می‌آید (شکل ۴).

محاسبه‌ی سختی تله

با اطلاعات مربوط به سری زمانی ثبت شده توانستیم به نمودار طیف توانی ذره برحسب فرکانس برسیم(شکل ۵)، با به دست آوردن فرکانس گوشه از روی نمودار و با توجه به رابطه‌ی (۴) توانستیم ضریب سختی تله را به دست آوریم.



شکل ۴: سری زمانی مربوط به جابه‌جایی ذره درون تله

۶. مقایسه‌ی روش پیشنهادی با فوتودیوود

برای مقایسه‌ی روش پیشنهادی خود با روش آشکارسازی فوتودیوود، نمودار سختی تله بر حسب توان لیزر را رسم کردیم. این نمودار با روش فوتودیوود چهارتایی خطی بوده است، لذا انتظار می‌رود با این روش آشکارسازی نیز به همان نمودار برسیم(شکل ۶).