روش های مونت کارلو در ترابرد ذرّات

تألیف:

دکتر علیرضا حقیقت

ترجمه:

دکتر فائزه رحمانی

www.ketab.ir

شماره ۴۴۰

سرشناسه: حقیقت، علیرضا، ۱۳۳۵ -
عنوان و نام پدیدآور: روش‌های مونت کارلو در ترابرد ذرات/تألیف علیرضا حقیقت ؛ ترجمه فائزه رحمانی.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدّین طوسی، انتشارات، ۱۳۹۶.
مشخصات ظاهری: ۳۱۵ص.: مصور،جدول،نمودار.
فروست: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدّین طوسی؛ شماره ۴۴۰.
شابک: 978-600-7867-54-9
وضعیّت فهرست نویسی: فیپا
یادداشت: عنوان اصلی: Monte Carlo Methods for Particle Transport,2016.
موضوع: نظریه انتقال.
موضوع: Transport Theory
موضوع: روش مونت کارلو
موضوع: Monte Carlo Method
شناسه افزوده: رحمانی، فائزه، ۱۳۶۰ - ، مترجم
رده بندی کنگره: ۱۳۹۶ ... QC
رده بندی دیویی: ۳۰/۱۳۸ ...
شماره کتابشناسی ملّی: ...۷۵۷۲۱

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدّین طوسی http://press.kntu.ac.ir

عنوان: روش‌های مونت کارلو در ترابرد ذرات
مؤلّف: علیرضا حقیقت
مترجم: دکتر فائزه رحمانی
نوبت چاپ: اوّل
تاریخ انتشار: آبان ۱۳۹۶، تهران
شمارگان: ۲۰۰ جلد
ویرایش: گروه ویراستاری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدّین طوسی
چاپ: دیرین نگار
صحّافی: گرنامی
قیمت: ۲۶۰۰۰ تومان

تمام حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی- پلاک ۴۷۰- انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدّین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲
میدان ونک - خیابان ولی‌عصر(عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - پلاک ۲۶۲۶- مرکز پخش و فروش انتشارات
تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): www.press.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

بسمه تعالی

مقدّمهٔ مترجم

اوّلین آشنایی من با شبیه‌سازی مونت‌کارلو و کدهای مبتنی بر آن به ۱۳۸۲ ش. برمی‌گردد. کلاس درسی که در آن به‌صورت داوطلبانه به منظور انجام پایان‌نامه کارشناسی ارشد و البتّه به توصیه استاد بزرگوارم شهید دکتر مجید شهریاری که خود مدّرس آن بودند، حضور یافتم. مفاهیم اوّلیه را در قالب آموزش مقدّماتی کد MCNP از ایشان آموختم. در ۱۳۸۵ ش. دوباره افتخار آن را داشتم که به عنوان یکی از درس‌های دورهٔ دکترا، شبیه‌سازی مونت‌کارلو را به صورت جامع‌تر در محضر ایشان فراگیرم. آنچه در این کلاس ارائه شد، بر اساس چندین مرجع و منبع منتخب و البتّه تجربه‌های ارزشمند شخصی آن استاد بزرگوار بود. آنچنان ارائهٔ این مباحث جذّاب بود که تا امروز، بخشی از فعالیّت‌های علمی‌ام در شبیه‌سازی مونت‌کارلو اختصاص یافته است. بعد از اتمام دورهٔ دکترا به تدریس شبیه‌سازی مونت‌کارلو کدهای مبتنی بر آن در کلاس‌های درسی و در قالب کارگاه‌های آموزشی پرداختم.

یکی از کمبودهایی که همیشه احساس می‌کردم فقدان یک مرجع واحد در زمینه آموزش مونت‌کارلو برای معرّفی به دانشجویان در گرایش هسته‌ای بود؛ همچنین با تعداد زیادی از کاربران کدهای مونت‌کارلو روبرو هستم که بدون اطّلاع از اصول و مبانی حاکم بر کدهای مونت‌کارلو، از آنها استفاده می‌کنند، که در برخی مواقع تحلیل نتایج و حتّی صحّت شبیه‌سازی و پیاده‌سازی مسائل توسط ایشان با خطا روبرو است. چندین بار برآن شدم تا تجربه‌های شخصی و دست‌نوشته‌های کلاسی را به‌صورت مدوّن برای ارائه به علاقمندان آماده کنم، اما صلاح ندیدم تا آن را به زمان دیگری و البتّه با کسب تجربه‌های بیشتر مؤکول کنم، پس به منظور دستیابی به اهداف بیان شده بر آن شدم تا کتاب پیش‌رو را که بخش عمده‌ای از مباحث مورد نظر را پوشش می‌دهد، ترجمه کنم.

همان طور که نویسنده هم اشاره کرده است، این کتاب می‌تواند به عنوان یک مرجع مناسب برای درس شبیه‌سازی مونت‌کارلو و فیزیک محاسباتی مقاطع تحصیلات تکمیلی در رشته‌های مهندسی هسته‌ای و فیزیک هسته‌ای مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی با توجّه به مشترک‌بودن مبانی مونت‌کارلو در کلّیهٔ رشته‌ها و گرایش‌ها، با در نظر گرفتن مثال‌های مرتبط با هر کاربری، این کتاب برای تدریس در دیگر رشته‌های علوم و مهندسی نیز قابل استفاده خواهد بود.

www.ketab.ir

در آخر، از آنجا که این کتاب نیز مانند هر دستاورد بشری خالی از ایراد نیست ، بنابراین صمیمانه پذیرای انتقادها و پیشنهادهای خوانندگان هستم و تقاضا دارم هر نوع ایراد احتمالی در متن را یادآوری کنند.

امیدوارم این کتاب گامی رو به جلو در راستای پیشرفت علمی کشور عزیزمان ایران باشد.

فائزه رحمانی

پاییز ۱۳۹۵ ش.

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۱ فصل اول ۱

معرّفی ۱

۱-۱ تاریخچهٔ شبیه‌سازی مونت‌کارلو ۱

۱-۲ جایگاه کدهای مونت‌کارلو ۴

۱-۳ هدف نگارش این کتاب ۶

۱-۴ مروری بر کتاب ۶

۱-۵ توصیه به استادان ۹

۱-۶ انتظار نویسنده ۱۱

مراجع ۱۱

۲ فصل دوم ۱۳

متغیّرهای تصادفی و نمونه‌برداری ۱۳

۲-۱ معرّفی ۱۳

۲-۲ متغیّرهای تصادفی ۱۴

۲-۲-۱ متغیّر تصادفی گسسته ۱۴

۲-۲-۲ متغیّر تصادفی پیوسته ۱۵

۲-۲-۳ نکاتی دربارهٔ مشخّصه‌های pdf وcdf ۱۷

۲-۳ اعداد تصادفی ۱۷

۲-۴ به‌دست آوردن فرمول اساسی مونت‌کارلو (FFMC) ۱۹

۲-۵ نمونه‌برداری از توابع چگالی یک بُعدی ۲۱

۲-۵-۱ معکوس‌کردن تحلیلی ۲۱

۲-۵-۲ معکوس‌کردن عددی ۲۲

۲-۵-۳ روش احتمال ترکیبی ۲۳

۲-۵-۴ روش طرد ۲۴

۲-۵-۵ ارزیابی عددی ۲۶

۲-۵-۶ مراجعه به جدول ۲۸

۲-۶ نمونه‌برداری از توابع چگالی چندبُعدی ۲۸

۲-۷ مثال برای مراحل نمونه‌برداری چند توزیع کاربردی متداول ۳۱

۲-۷-۱ توزیع نرمال ۳۱

۲-۷-۲ طیف وات ۳۳

www.ketab.ir

۲-۷-۳ نمونه‌برداری از توابع سینوس و کسینوس ۳۳
۲-۸ ملاحظات ۳۵
مراجع ۳۵
مسائل ۳۶

۳ فصل سوم **۴۱**

تولید عدد تصادفی **۴۱**

۳-۱ معرّفی ۴۱
۳-۲ رهیافت‌های تولید عدد تصادفی ۴۲
۳-۳ مولّدهای عدد شبه‌تصادفی (PRNGs) ۴۴
۳-۳-۱ مولّدهای متجانس ۴۵
۳-۳-۲ مولّد بازگشتی چندگانه ۵۴
۳-۴ آزمون تصادفی بودن ۵۵
۳-۴-۱ آزمون مربع کای ($\chi 2$) ۵۶
۳-۴-۱-۱ توزیع χ^2 ۵۶
۳-۴-۱-۲ مراحل استفاده از آزمون $\chi 2$ ۵۷
۳-۴-۲ آزمون تکرار ۵۸
۳-۴-۳ آزمون سری ۵۸
۳-۴-۴ آزمون بازه ۵۸
۳-۴-۵ آزمون پوکر ۵۸
۳-۴-۶ آزمون ممان ۵۸
۳-۴-۷ آزمون همبستگی سری ۵۹
۳-۴-۸ آزمون سری بودن با ترسیم ۵۹
۳-۵ مثال‌هایی برای آزمون‌های PRNG ۶۰
۳-۵-۱ ارزیابی PRNG مبتنی بر دورهٔ تناوب و متوسط ۶۰
۳-۵-۲ آزمون سری با ترسیم ۶۳
۳-۶ ملاحظات ۶۵
مراجع ۶۶
مسائل ۶۷

۴ فصل چهارم **۶۹**

مبانی آمار و احتمال **۶۹**

۴-۱ معرّفی ۶۹

www.ketab.ir

۴-۲ مقدار امید (مورد انتظار) ۷۰
۴-۲-۱ تابع چگالی یک بُعدی ۷۱
۴-۲-۲ تابع چگالی احتمال چند بُعدی ۷۳
۴-۲-۳ قضیّه‌های مفید در ارتباط با واریانس واقعی ۷۴
۴-۳ تعریف مقادیر امید نمونه برای استفاده در آمار ۷۴
۴-۳-۱ میانگین نمونه ۷۴
۴-۳-۲ مقدار امید واریانس نمونه ۷۵
۴-۴ صحّت و دقّت فرآیند آماری ۷۷
۴-۴-۱ توزیع یکنواخت ۷۸
۴-۴-۲ تابع توزیع دوجمله‌ای و برنولی ۷۹
۴-۴-۳ توزیع هندسی ۸۲
۴-۴-۴ توزیع پواسون ۸۴
۴-۴-۵ توزیع نرمال «گاوسی» ۸۷
۴-۵ قضیه های حدّی و کاربردهای آنها ۹۵
۴-۵-۱ نتیجه از قضیّهٔ مورد-لاپلاس ۹۵
۴-۵-۱-۱ کاربرد نتیجه بالا به قضیهٔ حدّی لویر-لاپلاس ۹۷
۴-۵-۲ قضیّهٔ حدّ مرکزی ۱۰۰
۴-۶ رابطهٔ عدم قطعیّت و خطای نسبی در فرآیند تصادفی ۱۰۳
۴-۶-۱ فرآیند تصادفی کلّی ۱۰۳
۴-۶-۲ حالت خاص فرآیند برنولی ۱۰۴
۴-۷ بازهٔ اطمینان برای تعداد محدود نمونه ۱۰۵
۴-۷-۱ معرّفی توزیع تی-دانشجو (تی) ۱۰۵
۴-۷-۲ تعیین محدودهٔ اطمینان و کاربرد توزیع تی ۱۰۷
۴-۸ آزمون نرمال‌بودن توزیع ۱۰۸
۴-۸-۱ آزمون ضریب چولگی ۱۰۸
۴-۸-۲ آزمون شاپیرو-ویلک برای نرمال بودن ۱۰۹
مراجع ۱۱۰
مسائل ۱۱۰

۵ فصل پنجم ۱۱۵

انتگرال‌ها و روش‌های کاهش خطا ۱۱۵

۵-۱ معرّفی ۱۱۵
۵-۲ محاسبهٔ انتگرال ۱۱۶

www.ketab.ir

۵-۳ روش‌های کاهش واریانس (خطا) مربوط به انتگرال‌ها ۱۷
۵-۳-۱ نمونه‌برداری ارزش ۱۸
۵-۳-۲ روش نمونه‌برداری همبستگی ۲۲
۵-۳-۳ روش نمونه‌برداری طبقه‌بندی شده ۲۳
۵-۳-۴ روش نمونه‌برداری ترکیب‌شده ۳۳
۵-۴ ملاحظات ۳۴
مراجع ۳۵
مسائل ۳۵

۶ فصل ششم ۳۷

ترابرد ذرّات به روش مونت‌کارلو برای چشمهٔ ثابت ۳۷

۶-۱ معرّفی ۳۷
۶-۲ معرّفی معادلهٔ بولتزمن خطّی ۳۸
۶-۳ معرّفی روش مونت‌کارلو ۴۰
۶-۳-۱ تعیین پرواز آزاد یا طول پویش ۴۱
۶-۳-۲ انتخاب نوع اندرکنش ۴۳
۶-۳-۳ انتخاب زاویهٔ پراکندگی ۴۴
۶-۴ الگوریتم مونت‌کارلو برای محاسبهٔ ذرّات صبوری ۴۸
۶-۵ محاسبات اغتشاش بر اساس نمونه‌برداری همبسته ۴۹
۶-۶ تحلیل نتایج مونت‌کارلو ۵۱
۶-۷ ملاحظات ۵۳
مراجع ۵۳
مسائل ۵۴

۷ فصل هفتم ۵۷

روش‌های کاهش خطا (واریانس) در ترابرد ذرّه ۵۷

۷-۱ معرّفی ۵۷
۷-۲ اثربخشی الگوریتم‌های کاهش واریانس ۵۹
۷-۳ بایاس کردن توابع چگالی ۵۹
۷-۳-۱ جذب ضمنی (یا بایاس بقا) ۶۰
۷-۳-۲ رولت روسی ۶۱
۷-۳-۳ بایاس کردن طول پویش تا برخورد بعدی ۶۱
۷-۳-۴ تبدیل نمایی ۶۲

www.ketab.ir

۷-۳-۵ برخورد واداشته ۱۶۳
۷-۴ روش تقسیم ۱۶۴
۷-۴-۱ تقسیم هندسی با رولت روسی ۱۶۵
۷-۴-۲ تقسیم انرژی با رولت روسی ۱۶۷
۷-۴-۳ تقسیم زاویه‌ای با رولت روسی ۱۶۷
۷-۴-۴ روش پنجره وزن ۱۶۷
۷-۵ کاربرد تلفیق نمونه‌برداری ارزش، بایاس کردن PDF و روش تقسیم در ترابرد ذرّه ۱۶۸
۷-۵-۱ اصول تابع ارزش (الحاقی) در نظریهٔ ترابرد یقینی ۱۶۸
۷-۵-۲ تعیین پاسخ آشکارساز ۱۶۹
۷-۵-۳ استفاده از تابع ارزش یقینی (الحاقی) برای نمونه‌برداری ارزش ۱۷۱
۷-۵-۳-۱ بایاس کردن چشمه ۱۷۱
۷-۵-۳-۲ بایاس کردن ترابرد ۱۷۲
۷-۵-۳-۳ CADIS (نمونه‌برداری ارزش بر اساس الحاقی سازگار) ۱۷۳
۷-۵-۳-۴ FW-CADIS ۱۷۴
۷-۶ ملاحظات ۱۷۵
مراجع ۱۷۵
مسائل ۱۷۷

۸ فصل هشتم ۱۸۱

گرفتن خروجی ۱۸۱

۸-۱ معرّفی ۱۸۱
۸-۲ کمیّت های اصلی در شبیه‌سازی ترابرد ذرّه ۱۸۲
۸-۳ گرفتن تالی در سامانه‌های پایا ۱۸۳
۸-۳-۱ تخمین گر برخورد ۱۸۳
۸-۳-۲ تخمین گر طول پویش ۱۸۶
۸-۳-۳ تخمین گر عبور از سطح ۱۸۷
۸-۳-۳-۱ تخمین چگالی جریان خالص و جزئی ۱۸۷
۸-۳-۳-۲ تخمین شار سطحی ۱۸۸
۸-۳-۴ تخمین‌گر تحلیلی ۱۹۰
۸-۴ گرفتن تالی در سامانه‌های وابسته به زمان ۱۹۲
۸-۵ تالی‌ها در شبیه‌سازی‌های غیرآنالوگ ۱۹۴
۸-۶ محاسبهٔ عدم قطعیّت نسبی ۱۹۵
۸-۷ انتشار عدم قطعیّت ۱۹۶
۸-۸ ملاحظات ۱۹۷

www.ketab.ir

مراجع ۱۹۸
مسائل ۱۹۸

۹ فصل نهم ۲۰۱

هندسه و دنبال کردن ذرّه ۲۰۱

۹-۱ معرّفی ۲۰۱
۹-۲ بحث بر روی رهیافت هندسه ترکیبی ۲۰۲
۹-۲-۱ تعریف سطوح ۲۰۳
۹-۲-۲ تعریف سلول ۲۰۴
۹-۲-۳ مثال‌ها ۲۰۵
۹-۳ تعریف شرایط مرزی ۲۰۷
۹-۴ ردگیری ذرات ۲۱۰
۹-۵ ملاحظات ۲۱۲
مراجع ۲۱۲
مسائل ۲۱۳

۱۰ فصل دهم ۲۱۷

ترابرد مونت‌کارلوی بحرانی یا مقدار ویژه ۲۱۷

۱۰-۱ معرّفی ۲۱۷
۱۰-۲ نظریّهٔ تکرار توان در حل مسائل مقدار ویژه ۲۱۸
۱۰-۳ محاسبهٔ مقدار ویژه با مونت‌کارلو ۲۲۱
۱۰-۳-۱ متغیّرهای تصادفی مرتبط با فرآیند شکافت ۲۲۲
۱۰-۳-۱-۱ تعداد نوترون‌های شکافت ۲۲۲
۱۰-۳-۱-۲ انرژی نوترون‌های شکافت ۲۲۳
۱۰-۳-۱-۳ جهت نوترون‌های شکافت ۲۲۳
۱۰-۳-۲ شبیه‌سازی مونت‌کارلوی یک مسئلهٔ بحرانی ۲۲۳
۱۰-۳-۳ تخمین‌گرهایی برای نمونه‌برداری از نوترون‌های شکافت ۲۲۷
۱۰-۳-۳-۱ تخمین‌گر برخورد ۲۲۷
۱۰-۳-۳-۲ تخمین‌گر جذب ۲۲۸
۱۰-۳-۳-۳ تخمین‌گر طول پویش ۲۲۸
۱۰-۳-۴ روش ترکیب تخمین‌گرها ۲۲۸
۱۰-۴ موارد مرتبط با روش محاسبهٔ مقدار ویژه استاندارد ۲۳۰
۱۰-۴-۱ روش‌های تشخیصی همگرایی چشمه ۲۳۰

www.ketab.ir

۱۰-۴-۲ روش‌شناسی ماتریس شکافت (FM) ۲۳۳
۱۰-۴-۲-۱ ماتریس پاسخ: رهیافت اول ۲۳۴
۱۰-۴-۲-۲ ماتریس شکافت: رهیافت دوم ۲۳۶
۱۰-۴-۳ موارد مرتبط با روش FM ۲۳۷
۱۰-۵ ملاحظات ۲۳۸
مراجع ۲۳۸
مسائل ۲۴۰

۱۱ فصل یازدهم **۲۴۵**

پردازش موازی و برداری روش مونت‌کارلو **۲۴۵**

۱۱-۱ معرفی ۲۴۵
۱۱-۲ پردازش برداری ۲۴۷
۱۱-۲-۱ کارآیی برداری شدن ۲۴۹
۱۱-۳ پردازش موازی ۲۵۰
۱۱-۳-۱ کارآیی موازی‌سازی ۲۵۱
۱۱-۴ برداری‌سازی روش مونت‌کارلو ۲۵۴
۱۱-۵ موازی‌سازی روش‌های مونت‌کارلو ۲۵۵
۱۱-۵-۱ دیگر الگوریتم‌های مونت‌کارلو موازی‌سازی ۲۵۶
۱۱-۶ توسعه الگوریتم موازی‌سازی با استفاده از ۲۵۶
۱۱-۷ ملاحظات ۲۶۱
مراجع ۲۶۱
مسائل ۲۶۲

پیوست اول **۲۶۵**

عملیّات رقمی بر روی رایانهٔ باینری ۲۶۵
مراجع ۲۶۷

پیوست دوم **۲۶۹**

جداول کامل آزمون شاپیرو-ویلک ۲۶۹

پیوست سوم **۲۷۵**

استخراج فرمول جهت پراکندگی ۲۷۵
مباحثی در ارتباط با هندسهٔ یک بُعدی ۲۷۸

www.ketab.ir

پیوست چهارم ۲۷۹

فرمول زاویهٔ فضایی ۲۷۹

پیوست پنجم ۲۸۱

اندرکنش‌های نوترون-هسته وابسته به انرژی در شبیه‌سازی مونت‌کارلو ۲۸۱

معرّفی ۲۸۱

پراکندگی کشسان ۲۸۲

پراکندگی غیرکشسان ۲۸۳

پراکندگی در انرژی‌های حرارتی ۲۸۴

پیوست ششم ۲۸۷

استخراج فرمول آنتروپی شانون ۲۸۷

رهیافت ۱ ۲۸۷

رهیافت ۲ ۲۸۹

www.ketab.ir