



RSC813-3

دراسات نقدية 3

Task5

Prepared by

Mohammed Omar Bin Makhashen

242001540@st.midocean.edu.km

محمد عمر بن مخاشن

Ph.D. student in IT

2025-Mar-8

المحتوى

رسالة الدكتوراه

تحليل وإبداء الملاحظات والتوصيات لتطوير الدراسة والاقتراحات لأبحاث مستقبلية

- التعريف بالبحث
- تحليل وملاحظات عامة
- تحليل تفصيلي مع الملاحظات
- توصيات توسيع البحث
- مقترحات لأبحاث مستقبلية
- خاتمة

عنوان الرسالة: (Quantum Modelling and Data Analysis)

اسم المؤلف: (Zhongting Huang)

الجامعة: (University of Leicester)

الدرجة العلمية: دكتوراه في الفلسفة (Doctor of Philosophy)

تاريخ تقديم الرسالة: ٢٠٢٢ ديسمبر

الملاحظات بشكل عام:

- تقدم الرسالة نهجًا مبتكرًا للغاية من خلال التطبيق المنهجي لمفاهيم وأدوات رياضية ميكانيكية الكم على مجال تحليل البيانات والنمذجة.
- العمل دقيق رياضيًا، مع تعريفات ونظريات وبراهين واضحة.
- يقدم استكشاف التقنيات المستوحاة من الكم وجهات نظر جديدة حول التحليل الإحصائي والتعلم الآلي والعمليات العشوائية.
- يساعد تضمين الأمثلة الملموسة ودراسات الحالة، وخاصة تجميع البيانات الثنائية وتحليل قفزات مؤشر الأسهم، في توضيح الأهمية العملية المحتملة للطرق المقترحة.
- يمكن أن تستفيد الرسالة من مزيد من المناقشة حول التعقيد الحسابي وإمكانية تنفيذ هذه التقنيات المستوحاة من الكم على منصات الحوسبة الكلاسيكية أو الكمومية.

التحليل والملاحظات

3

المفاهيم الأساسية: تبدأ الرسالة بأساس متين من خلال تقديم الهياكل الرياضية الأساسية مثل نظرية الزمر و محصرات لي (Lie brackets). التعريفات والأمثلة المقدمة في الفصل الثالث ضرورية للتطور اللاحق للتقنيات المستوحاة من الكم. الإشارة الصريحة إلى تعريف محصورة لي $[X, Y] = XY - YX$ أمر أساسي في فهم الطبيعة غير التبادلية التي تنشأ غالبًا في ميكانيكا الكم وأهميتها المحتملة لتحليل البيانات حيث قد تكون تفاعلات المتغيرات معقدة.

الصورية الكمومية والمؤثرات: يضع الفصل الرابع الإطار الميكانيكي الكمي الضروري باستخدام تدوين ديراك (Dirac notation). يتم عرض تعريفات الكيت (kets) $|\psi\rangle$ والبرا (bras) $\langle\psi|$ جنبًا إلى جنب مع تعبيراتها في فضاء هيلبرت (Hilbert space)، بشكل واضح. يعد تقديم المؤثرات الخاصة مثل المؤثرات الهرميتية (Hermitian) والوحدوية (Unitary) أمرًا حيويًا، حيث تشكل هذه اللبنات الأساسية لتمثيل الملاحظات والتحويلات في النماذج المستوحاة من الكم. تم ذكر شروط المؤثر الهرميتي ($H = H^*$, $H_{ij} = H^*_{ji}$) والمؤثر الوحدوي ($UU^* = I$) بشكل صحيح.

التقنيات المستوحاة من الكم: يبلغ الجزء الأول ذروته في الفصل الخامس، الذي يقدم العديد من التقنيات الشيقة المستوحاة من الكم. يسلط استخدام إجراءات مثل جرام-شميدت (Gram-Schmidt) وتفكيك القيم المفردة (SVD) لتوليد مؤثرات خاصة الضوء على وجود صلة بين الجبر الخطي وبناء المؤثر الكمي. يربط استكشاف المؤثرات الوحدوية المعقدة في الصورة الأسية ($U_t = e^{-itH}$) التطور الكمي بالمؤثرات الهرميتية ويقترح طريقة لنمذجة العمليات الديناميكية في البيانات.

التحليل والملاحظات

4

المقاييس الإحصائية باستخدام المؤثرات: يقدم القسم 5.3 نهجًا جديدًا لتحديد المقاييس الإحصائية مثل التوقع (expectation)، والتوقع الشرطي (conditional expectation)، والتباين (variance)، والتباين المشترك (covariance) باستخدام مؤثرات الكثافة (density operators). يربط تعريف توقع مؤثر A بأنه $\text{tr}(\rho A)$ أو الأثر (trace) لمصفوفة ضرب المؤثر في مؤثر الكثافة، أو $\text{tr}(\rho A)$ أو $\text{tr}(\rho A)$ ، أو وصف حالات الكم مع المتوسطات الإحصائية. إن معالجة التوقع الشرطي باستخدام المؤثرات هي أداة قوية محتملة لتحليل التبعيات في مجموعات البيانات المعقدة.

الخوارزميات والنماذج الكمومية: يشير تضمين خوارزمية بحث جروفر (Grover's Search Algorithm) كتقنية مستوحاة من الكم إلى إمكانية الاستفادة من التسريع الكمي في مهام تحليل البيانات المتعلقة بالبحث. علاوة على ذلك، يقدم استكشاف المشيات العشوائية الكمومية (quantum random walks) نموذجًا احتماليًا بخصائص كمومية جوهرية، مما يدل على انحرافات عن المشيات العشوائية الكلاسيكية من حيث التباين. إن مناقشة إحصاءات ماكسويل-بولتزمان، وبوز-أينشتاين، وفيرمي-ديراك في سياق النماذج ذات الحدين الكمومية هو نهج فريد لدمج سلوكيات إحصائية مختلفة في نمذجة البيانات.

التطبيقات المستوحاة من الكم: يعرض الجزء الثاني تطبيق هذه التقنيات. تعتبر خوارزمية تجميع البيانات الثنائية (Binary Data Clustering) المستوحاة من بحث جروفر تطبيقًا مثيرًا للاهتمام بشكل خاص، مما يشير إلى طريقة مستوحاة من الكم للتعامل مع مخاليط البيانات. يعد تقديم دالة مخاطرة من النوع الكمومي $|\text{tr}[\rho U]|$ لتقدير المعلومات في التجميع مفهومًا جديدًا. يوفر تحليل الشرط التبادلي لمؤثرات لا رؤى حول خصائص مؤثر الخليط.

التحليل والملاحظات

5

النمذجة العشوائية باستخدام مؤثرات الإزاحة: يوفر استخدام مؤثرات الإزاحة (shift operators) للنمذجة العشوائية في القسم 7.2 واستكشاف الدوال الأسية مع هذه المؤثرات إطارًا لتحليل التبعيات الزمنية في البيانات. يعد اشتقاق الدوال المميزة (characteristic functions) لهذه المؤثرات دقيقًا من الناحية الرياضية ويمكن أن يكون مفيدًا لتحليل الخصائص الطيفية لديناميكيات البيانات. النهج العام لمؤثر M ذي الدورة m هو تعميم قيم.

تدفق الزمن المستمر وديناميكيات هاميلتونيان: يفتح الارتباط بمعادلة شرودنجر (Schrödinger equation) وتدفق الزمن المستمر باستخدام المؤثرات اللاحقة المشتقة من هاميلتونيان هرميتي (Hermitian Hamiltonians) آفاقًا لنمذجة تطور حالات البيانات في الزمن المستمر. يقدم المثال باستخدام مصفوفات باولي (Pauli matrices) توضيحًا ملموسًا لهذه المفاهيم. يُظهر الشكل العام لـ X_t ودراسات الحالة، مثل حل مؤثر كثافة الإزاحة لقفزات مؤشر الأسهم، إمكانية تطبيق هذه الطرق على بيانات مالية واقعية.

تحويل مؤثر الكثافة: تعتبر المناقشة حول تحويل مؤثر الكثافة ($\tilde{\rho} = U\rho U^*$) وتأثيره على توقع الملاحظات مهمة لفهم كيف يمكن للتحويلات اللاحقة تبسيط أو تقديم وجهات نظر مختلفة حول توزيعات البيانات.

التوصيات - توسيع نطاق البحث بشكل أكبر:

تحليل التعقيد الحسابي والتنفيذ (Computational Complexity and Implementation Analysis): أحد الاتجاهات الحاسمة هو التعمق في التعقيد الحسابي للتقنيات المقترحة المستوحاة من الكم. في حين أن الرسالة تقدم أطراً نظرية جديدة، إلا أن التحليل التفصيلي للموارد الحسابية المطلوبة لتنفيذها أمر ضروري. يمكن أن يشمل ذلك:

- تحليل التعقيد الزمني والمكاني (time and space complexity) لخوارزميات مثل تجميع البيانات الثنائية المستوحى من الكم بناءً على بحث جروفر (Grover's search).
- التحقق من جدوى تنفيذ هذه التقنيات على منصات الحوسبة الكلاسيكية وتحديد الاختناقات المحتملة.
- استكشاف إمكانية التنفيذ على أجهزة الحوسبة الكمومية (quantum computing) الفعلية مع تقدم المجال. سيتطلب ذلك ربط الخوارزميات المستوحاة من الكم بالدوائر الكمومية والنظر في قيود الأجهزة الكمومية الحالية.

قابلية التفسير والمزايا مقارنة بالطرق الكلاسيكية (Interpretability and Advantages over Classical Methods): يمكن أن يركز المزيد من البحث على تعزيز قابلية تفسير (interpretability) النماذج المستوحاة من الكم وتقييم مزاياها بدقة مقارنة بتقنيات تحليل البيانات الكلاسيكية الراسخة. يمكن أن يشمل ذلك:

- مقارنة أداء (مثل الدقة، والإحكام، والاسترجاع لمهام التجميع أو التصنيف) الخوارزميات المستوحاة من الكم مع أحدث الخوارزميات الكلاسيكية على مجموعات البيانات القياسية.
- التحقق مما إذا كانت النماذج المستوحاة من الكم يمكن أن تلتقط أنماط بيانات معقدة أو تبعيات يصعب على النماذج الكلاسيكية تحديدها، ربما بسبب الطبيعة غير التبادلية الكامنة المستوحاة من ميكانيكا الكم. (يتبع...)

التوصيات - توسيع نطاق البحث بشكل أكبر:

قابلية التفسير والمزايا مقارنة بالطرق الكلاسيكية : (استكمال)

- تطوير طرق لاستخلاص رؤى أو تفسيرات ذات مغزى من المعلومات والهياكل الخاصة بالنماذج المستوحاة من الكم. على سبيل المثال، فهم أهمية "احتمالية الخليط" p في تجميع البيانات الثنائية.

التوسع إلى مجالات وتطبيقات ومجموعات بيانات جديدة (Expansion to New Application Domains and Datasets): تُظهر

الرسالة الحالية تطبيقات واعدة في تجميع البيانات الثنائية وتحليل قفزات مؤشر الأسهم. يمكن للعمل المستقبلي استكشاف قابلية تطبيق هذه التقنيات وغيرها من التقنيات المستوحاة من الكم على نطاق أوسع من المجالات، مثل:

- **معالجة اللغة الطبيعية (Natural Language Processing):** نمذجة العلاقات الدلالية المعقدة باستخدام تمثيلات قائمة على المؤثرات.
- **المعلوماتية الحيوية (Bioinformatics):** تحليل البيانات البيولوجية عالية الأبعاد وتحديد الارتباطات الدقيقة.
- **تحليل الشبكات الاجتماعية (Social Network Analysis):** فهم ديناميكيات الشبكة وهياكل المجتمع باستخدام المشيات العشوائية الكمومية (quantum random walks) أو نماذج التفاعل القائمة على المؤثرات.
- اختبار قوة التحمل والتعميم للطرق المقترحة على مجموعات بيانات متنوعة وأكبر [8.2, 10].

التوصيات - توسيع نطاق البحث بشكل أكبر:

تطوير مناهج هجينة كمومية-كلاسيكية (Development of Hybrid Quantum-Classical Approaches): نظرًا للقيود الحالية للحوسبة الكمومية، فإن استكشاف المناهج الهجينة التي تجمع بين نقاط قوة التقنيات المستوحاة من الكم وموارد الحوسبة الكلاسيكية يمكن أن يكون اتجاهًا مثمرًا. قد يشمل هذا:

- استخدام الخوارزميات المستوحاة من الكم لتهيئة أو تحسين معلمات نماذج التعلم الآلي الكلاسيكية.
- تطوير تقريبات كلاسيكية للخطوات المستوحاة من الكم والمكلفة حسابيًا.

توسعات وتحسينات نظرية (Theoretical Extensions and Refinements): يمكن تطوير الإطار النظري المقدم في الرسالة بشكل أكبر عن طريق:

- التحقق من خصائص المقاييس الإحصائية المقترحة المستوحاة من الكم (مثل التوقع، التباين المشترك مع المؤثرات) بمزيد من التفصيل.
- استكشاف طرق بديلة لبناء المؤثرات والنماذج المستوحاة من الكم لأنواع مختلفة من البيانات ومهام التحليل. على سبيل المثال، التحقق من أشكال مختلفة من المؤثرات الوحدوية (unitary operators) بخلاف الشكل الأساسي.
- إضفاء الطابع الرسمي على الروابط بين مبادئ ميكانيكا الكم المحددة (مثل التشابك (entanglement)، التراكب (superposition)) والسلوك الملحوظ للنماذج المستوحاة من الكم في تحليل البيانات.

التوصيات - توسيع نطاق البحث بشكل أكبر:

استكشاف أعمق للنمذجة العشوائية (Deeper Exploration of Stochastic Modeling):

- يمكن توسيع نطاق العمل على النمذجة العشوائية باستخدام مؤثرات الإزاحة (shift operators) وتدفق الزمن المستمر عن طريق:
 - التحقق من الخصائص الإحصائية لنماذج السلاسل الزمنية الناتجة بمزيد من العمق.
 - استكشاف استخدام هاميلتونيان (Hamiltonians) أكثر تعقيدًا بخلاف التركيبات الخطية لـ مصفوفات باولي (Pauli matrices) لنمذجة ديناميكيات أكثر ثراءً.
 - إجراء المزيد من التحقق التجريبي المكثف للنماذج على بيانات السلاسل الزمنية الواقعية.

تحليل دقيق للتوسع الحسابي (Rigorous Analysis of Computational Scaling):

- يجب أن يعطي البحث المستقبلي الأولوية لتحليل مفصل للتعقيد الحسابي (computational complexity) للخوارزميات المستوحاة من الكم المقدمة. يجب أن يتجاوز هذا الاعتبارات النظرية ويشمل تقييمات تجريبية على الأجهزة الكلاسيكية لتحديد الاختناقات (bottlenecks) في الأداء. علاوة على ذلك، سيكون استكشاف التسريع (speedups) المحتمل تحقيقه على منصات الحوسبة الكمومية (quantum computing platforms) لخوارزميات محددة، مثل التجميع المستوحى من جروفر (Grover-inspired clustering)، مساهمة كبيرة. يمكن أن يشمل ذلك تقدير متطلبات الموارد (resource requirements) (مثل عدد الكيوبتات، عدد البوابات) للخوارزميات الكمومية المستهدفة.

المعيارية المقارنة والمزايا الخاصة بالمجال (Comparative Benchmarking and Domain-Specific Advantages):

- يتمثل أحد الاتجاهات الرئيسية في إجراء معيارية (benchmarking) شاملة للتقنيات المستوحاة من الكم مقابل أحدث الطرق الكلاسيكية (state-of-the-art classical methods) عبر مجموعات بيانات متنوعة [8.2، 10]. يجب أن يركز البحث على تحديد مجالات تطبيقية محددة تقدم فيها هذه المناهج المستوحاة من الكم مزايا واضحة من حيث الدقة، أو الكفاءة، أو القدرة على التقاط خصائص البيانات المعقدة (مثل التبعية غير الخطية (non-linear dependencies)، المخالط المعقدة (intricate mixtures) كما هو مقترح في التجميع الثنائي).

تصميم الخوارزميات الهجينة وتحسينها (Hybrid Algorithm Design and Optimization):

- بالنظر إلى المشهد الحالي للحوسبة الكمومية، فإن التحقيق في الخوارزميات الهجينة الكمومية-الكلاسيكية (hybrid quantum-classical algorithms) التي تستفيد من نقاط قوة كلا النموذجين هو مجال واعد. يمكن أن يشمل ذلك استخدام طرق مستوحاة من الكم لمهام مثل تهيئة المعلمات (parameter initialization) أو اختيار الميزات (feature selection) في نماذج التعلم الآلي الكلاسيكية. سيكون تحسين الواجهة و نقل البيانات (data transfer) بين المكونات الكلاسيكية والكمومية أمرًا بالغ الأهمية لفعالية هذه المناهج الهجينة.

توسيع الإطار النظري (Extending the Theoretical Framework):

- يمكن للعمل المستقبلي التعمق أكثر في الأسس النظرية للتقنيات المقترحة. وهذا يشمل:
- زيادة استكشاف الخصائص الإحصائية (statistical properties) لمقاييس التوقع (expectation) و التباين المشترك (covariance) القائمة على المؤثرات وعلاقتها بالمفاهيم الإحصائية الكلاسيكية.
- التحقيق في تركيبات بديلة للمؤثرات المستوحاة من الكم (quantum-inspired operators) بخلاف تلك المقدمة (على سبيل المثال، استكشاف استخدام أنواع مختلفة من البوابات الوحدوية (unitary gates) أو مؤثرات هرميتية (Hermitian operators) أكثر تعقيدًا).
- التحليل الرسمي لكيفية تجلي مبادئ ميكانيكا الكم (quantum mechanical principles) المحددة، مثل التشابك (entanglement) و التراكب (superposition)، ومساهمتها في أداء طرق تحليل البيانات هذه.

النمذجة العشوائية المتقدمة باستخدام المؤثرات الكمومية (Advanced Stochastic Modeling with Quantum Operators):

- يمكن توسيع إطار النمذجة العشوائية (stochastic modeling framework) باستخدام مؤثرات الإزاحة (shift operators) بشكل كبير. يمكن أن يشمل ذلك:
- تطوير نماذج تستند إلى فضاءات هيلبرت عالية الأبعاد (higher-dimensional Hilbert spaces) لتمثيل فضاءات حالات (state spaces) أكثر تعقيدًا.
- التحقيق في استخدام هاميلتونيان يعتمد على الزمن (time-dependent Hamiltonians) في نماذج تدفق الزمن المستمر (continuous time flow) لالتقاط ديناميكيات غير مستقرة (non-stationary dynamics) في البيانات.
- إجراء التحقق التجريبي (empirical validation) لهذه النماذج المستوحاة من الكم للسلاسل الزمنية على نطاق أوسع من مجموعات البيانات الواقعية، بما في ذلك البيانات المالية كما تم استكشافه في دراسة الحالة.

قابلية تفسير وتوضيح النماذج المستوحاة من الكم (Interpretability and Explainability of Quantum-Inspired Models):

- هناك مجال حاسم للبحث المستقبلي وهو تعزيز قابلية تفسير وتوضيح (interpretability and explainability) النماذج المستوحاة من الكم. سيكون تطوير تقنيات لاستخلاص رؤى ذات مغزى من معلمات النموذج (مثل الزاوية θ في التجميع الثنائي) أو هيكل المؤثرات الكمومية أمرًا ضروريًا لاعتمادها وفهمها على نطاق أوسع.

خاتمة

اجد البحث يقدم منهجًا مبتكرًا لتطبيق مفاهيم ميكانيكا الكم على تحليل البيانات، متجاوزًا الأساليب الكلاسيكية بدقة رياضية وأمثلة عملية. تفتح الرسالة آفاقًا جديدة للبحث المستقبلي في تقنيات تحليل البيانات المستوحاة من الكم، وتمثل مساهمة قيمة للمجال الناشئ بأساس غني للتطوير.



Thank You