

# Implementation of a Symbolic Logic and Common Sense Reasoning System Based on a Quantum-Classical Hybrid Architecture

Yong-Qi Li

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
C112151107@nkust.edu.tw

Chen-En Liang

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
C112151117@nkust.edu.tw

Rui-Qi Ding

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
C113151151@nkust.edu.tw

Ting-Wei Hsu

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
C113151133@nkust.edu.tw

Wen-Yu Chung

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
wychung@nkust.edu.tw

Lien-Fa Lin

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
lienfa@nkust.edu.tw

Chih-Chiang Wang

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
ccwang@nkust.edu.tw

Chun-Hao Chen

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
chench@nkust.edu.tw

Athanasios V. Vasilakos

The Center for AI Research  
University of Agder  
Grimstad, Norway  
th.vasilakos@gmail.com

Weng-Long Chang

Department of Computer Science and  
Information Engineering  
National Kaohsiung University of  
Science and Technology  
Kaohsiung City, Taiwan  
changwl@nkust.edu.tw

**Abstract**—本研究提出一套基於量子與古典混合架構 (Quantum-Classical Hybrid Architecture) 的符號邏輯與常識推論系統，旨在探索突破傳統人工智慧在處理龐大規則庫時所面臨的組合搜尋瓶頸。有別於依賴海量參數的統計學習模型。本系統將經典的 McCarthy 邏輯推演情境轉化為量子電路的限制滿足問題 (Constraint Satisfaction Problem)。在實作上，我們將基本事實與邏輯限制條件 (如 at、in、walkable 等) 編碼為量子邏輯電路中的相位反轉 (Oracle)，並利用 Qiskit 模擬器與 Grover 演算法的 compute、uncompute 及 diffusion 機制進行候選狀態的平行搜尋與放大；同時交由古典運算端負責條件規則 (if-else rules) 的動態控制與知識集合的更新。本研究不僅成功驗證了該混合系統能逐步推導出「步行至車旁並開車前往機場」之正確結論，更展示了此架構未來在面對指數型成長的常識圖譜時，發揮量子二次加速潛力之工程可行性。

**Keywords**—quantum-classical hybrid architecture, symbolic logic, common sense reasoning, quantum constraint satisfaction problem, Grover's algorithm

## I. INTRODUCTION

雖然深度學習在當代人工智慧中已取得顯著成功，但其通常依賴缺乏邏輯可解釋性的黑箱模型。相比之下，受 John McCarthy 所提出的經典「Advice Taker」啟發的符號邏輯與常識推理系統，則具備完全的可解釋性。然而，當傳統古典電腦試圖在呈指數成長的規則庫中檢

與匹配事實時，會遭遇嚴重的組合搜尋瓶頸。隨著含雜訊中等規模量子 (NISQ) 技術的快速發展，一個重要問題隨之浮現：如何將量子與古典電腦進行混合，以加速明確的符號邏輯檢索與演繹推理？

為了解決此一挑戰，我們提出一種量子-古典混合架構，作為常識推理的概念驗證。不同於依賴統計式自然語言處理模型的方法，我們將邏輯演繹建模為一個量子電路的限制滿足問題。限制滿足問題即是我們定義一組物件 (object)，而這些物件需要滿足特定地條件或限制。以 McCarthy 經典的「前往機場」情境作為基準，我們將前提 (例如 at(I, desk)) 編碼為量子相位反轉 (Oracle)。在此混合系統中，量子計算單元利用 Grover 演算法進行平行模式匹配與狀態振幅放大，而古典計算單元則負責動態規則鏈的執行管理。透過在一個 6 量子位元的量子模擬器上成功推導出結論「走到車子並開車前往機場」，本研究展示了利用量子加速 ( $O(\sqrt{N})$ ) 來增強古典規則式人工智慧系統的可行性與潛力。

雖然近期在量子自然語言處理 (QNLP) 領域的研究主要集中於文本分類或參數化量子模型 [20, 21]，本研究則採取不同的路徑。我們將明確的邏輯演繹建模為一個量子限制滿足問題。

## II. 常識推論之邏輯建構與編碼策略

本研究的混合運算系統旨在處理經典的邏輯推演問題。我們採用 McCarthy 於 1958 年提出的「Advice Taker」經典範例作為常識推理的驗證目標。在該情境中，系統已知的前提與事實包含：「我坐在家裡的書桌前」、「我的車也在家裡」、「家裡可以步行」、「縣道可以開車」、「家與機場都在同一個縣」等。目標是系統必須自動推導出「如何前往機場」的具體行動方案。

### A. 謂詞表示法與初始知識庫

為了讓量子電路與古典程式能處理這些常識，我們首先將自然語言轉化為符號邏輯中的謂詞 (Predicates) 表示法。例如，二元謂詞  $at(x, y)$  代表「x 在 y」，一元謂詞  $walkable(home)$  代表「家裡可以步行」。基於上述情境，系統初始的知識庫 (Knowledge Base) 可以表示為以下謂詞集合 (Predicate-set)：

$$\{at(I, desk), at(desk, home), at(car, home), in(home, county), in(airport, county), walkable(home), drivable(county), go(airport), wish(go(airport))\} \quad (1)$$

### B. 特徵編碼與狀態映射

我們將謂詞的參數 (Arguments) 視為輸入特徵 (Features)，並將該謂詞是否成立視為標籤 (Label) 或布林真值。

為了與量子電路 (Quantum Circuits) 整合，我們為系統領域 (Domain) 中所有的實體物件分配了一組 3-bit 的二進位 ID。其對應關係如下表所示：

TABLE I. 實體物件的二進位編碼表

Object	3-bit ID	Description
I / me	000	第一人稱主體
desk	001	書桌
car	010	汽車
home	011	家
county	100	縣市
airport	101	機場

透過此編碼映射，一個二元謂詞 (如  $at(I, desk)$ ) 的輸入特徵可被編碼為 6-bit 的資料量子位元 (Data Qubits)，而其真值結果 (Label) 則映射至 1-bit 的標記量子位元 (Flag Qubit)。量子端透過 Grover 演算法搜尋符合條件的 ID 組合，並將結果回傳給古典端。

### C. 古典端演繹規則鏈條

古典運算端 (CPU) 在此混合系統中扮演「規則控制器」的角色。當量子端搜尋出滿足條件的事實後，古典程式會根據以下六條核心規則 (If-Then Rules) 進行邏輯鏈條 (Rule Chain) 的推演，並將推導出的新事實動態加入知識庫中：

**R1:** 如果我在桌子旁，並且桌子在家，並且車子在家，然後家中可以走路，所以推得「我可以從桌旁用走路的方式移動到車子裡」。(2)

**R2:** 因為已推得可以從桌子旁走到車裡，所以我從桌旁走到車裡。(3)

**R3:** 因為我從桌旁走到車裡，因此我現在在車裡。(4)

**R4:** 如果我在車裡，家跟機場都在城市中，並且城市中裡可以開車，所以推得「我們可以從家裡藉由城市中的道路開車前往機場」。(5)

**R5:** 因為已推得可以從家中開車前往機場，所以我從家中開車前往機場。(6)

**R6:** 因為我從家中開車前往機場，所以我現在已經在機場。(7)

藉由這套嚴密的編碼與規則系統，本研究成功建立起一套分工明確的混合架構：量子端負責複雜條件的平行檢索 (如找出滿足 R1 前提的狀態)，古典端負責觸發 R1 到 R6 的時序邏輯，最終精準推導出  $at(I, airport)$  的結論。

## III. 量子與古典混合電路之推論實作

本研究將前提、事實與演繹規則，透過量子與古典混合電路進行映射與求解。系統領域 (Domain) 包含「I」、「desk」、「home」、「car」、「county」與「airport」六個基礎物件。

### A. 量子位元特徵編碼策略

為了利用量子疊加態所帶來的巨大平行運算優勢，我們將自然語言中的參數值進行二進位特徵編碼。具體而言，我們分配第一組量子暫存器  $q_0, q_1, q_2$  來編碼謂詞 (Predicate) 的第一個參數，並使用第二組量子暫存器  $q_3, q_4, q_5$  編碼第二個參數。例如，主詞「I」編碼為 000、受詞「desk」編碼為 001，因此前提  $at(I, desk)$  對應之特徵輸入狀態為  $|000001\rangle$ 。對於如  $go(desk, car, walking)$  包含三個參數之動作謂詞，則額外加入量子位元  $q_6$ ，以 0 代表「walking」、1 代表「driving」。

### B. 邏輯謂詞之量子布林電路實作

在混合架構中，古典邏輯運算必須轉譯為可逆的量子邏輯閘。我們利用 NOT (X 閘) 與多控制 NOT (MCX / CCNOT 閘) 來實作基礎的 AND 與 OR 邏輯運算子。

我們將每一個已知事實轉換為對應的量子布林函數。以判定一元謂詞  $walkable(home)$  為例，其輸入特徵為「home」(011)，我們設計一組量子布林電路  $O_f(|q[0]\rangle, |q[1]\rangle, |q[2]\rangle)$  作為條件判斷。當輸入之三個量子位元為  $|011\rangle$  時，該電路輸出為 1：

$$O_3(|q[0]\rangle, |q[1]\rangle, |q[2]\rangle) = (|\bar{q}[0]\rangle \wedge |q[1]\rangle \wedge |q[2]\rangle) \quad (8)$$

對於具有多重組合的初始事實，例如包含  $at(I, desk)$  ( $|000001\rangle$ )、 $at(desk, home)$  ( $|001011\rangle$ ) 與  $at(car, home)$  ( $|010011\rangle$ ) 的 at 關係，我們建構了綜合的量子布林電路  $O_f(|q[0]\rangle, \dots, |q[5]\rangle)$ 。只要輸入狀態滿足上述任一條件，輸出即為 1：

$$O_1(|q[0]\rangle, |q[1]\rangle, |q[2]\rangle, |q[3]\rangle, |q[4]\rangle, |q[5]\rangle) = (|\bar{q}[0]\rangle \wedge |q[1]\rangle \wedge |\bar{q}[2]\rangle \wedge |q[3]\rangle \wedge |q[4]\rangle \wedge |q[5]\rangle) \vee (|\bar{q}[0]\rangle \wedge$$

$$(|\overline{q[1]}\rangle \wedge |q[2]\rangle \wedge |\overline{q[3]}\rangle \wedge |q[4]\rangle \wedge |q[5]\rangle) \vee (|\overline{q[0]}\rangle \wedge |q[1]\rangle \wedge |\overline{q[2]}\rangle \wedge |\overline{q[3]}\rangle \wedge |q[4]\rangle \wedge |q[5]\rangle) \quad (9)$$

相同之映射邏輯亦應用於  $in(home, county)$  與  $drivable(county)$  等所有前提與衍生結果中。

### C. 推論狀態的神諭 (Oracle) 編碼

前述的量子布林電路在演算法中被作為 Compute (計算) 階段。為進行解答的平行檢索, Compute 電路將搭配一個 Z 閘 (Phase gate) 以及反向的 Uncompute (反運算) 電路, 共同組成 Grover 演算法中的神諭 (Oracle)。

當古典端 (CPU) 發出邏輯匹配需求時, 此神諭會符合布林函數條件 (即解, 如  $O3=1$ ) 的量子態振幅乘以  $-1$  進行相位反轉。最後透過擴散算子 (Diffusion Operator) 降低非解的振幅、提升正確解答的機率振幅, 並將量測結果交由古典程式執行後續的 if-then 推理鏈。

### IV. 實作與量測結果

本系統實作包含四組量子檢索神諭 (Walkable、Drivable、AT、IN) 以及古典端的規則推演程式。每一次的量子檢索皆包含計算 (Compute)、相位反轉 (Z gate)、反計算 (Uncompute) 與擴散算子 (Diffusion Operator) 四個步驟。

以 walkable 邏輯為例, 我們首先透過 Walkable\_COMPUTE 將滿足條件的狀態進行運算, 接著利用 Z 閘將  $q3$  狀態  $|1\rangle$  之振幅乘以  $-1$ 。隨後以反向順序執行 Walkable\_UNCOMPUTE, 上述三者共同完成了神諭 (Oracle) 之建構。最後套用擴散電路, 以降低非解答之振幅並放大解答之振幅。在 2048 次的量測中, 正確狀態 011 (即 home) 的機率高達 0.94, 其餘狀態之機率皆趨近於 0。該二進位結果被古典端轉換為十進位數字 3, 並寫入本地端檔案 walkable\_ans.txt 中。

針對其他邏輯, 其實作方式與量測結果如下:

- Drivable 邏輯: 經 Grover 演算法迭代後, 狀態 100 的量測機率達 0.95, 轉換為十進位 4 並紀錄為解答。
- AT 邏輯: 由於輸入狀態可能滿足三個子句其中之一, 神諭會對應地進行相位反轉。其結果成功均勻放大 000001、001011 與 010011 三個解答狀態, 機率皆約為 0.28 至 0.29, 並分別轉換為十進位 1、11、19 寫入檔案。
- IN 邏輯: 成功找出滿足條件的狀態 011100 與 101100, 量測機率分別為 0.48 與 0.52, 轉換為十進位 28 與 44 寫入檔案。

當所有量子量測結果皆寫入文字檔後, 古典端的 Python 程式即開始執行以規則為基礎 (Rule-based) 的推論。系統首先載入量測結果並比對規則 R1: 若  $at(I, desk)$ 、 $at(desk, home)$ 、 $at(car, home)$  與  $walkable(home)$  皆成立, 則觸發  $can(go(desk, car, walking))$ , 並將結果轉換為十進位 10 寫入解答檔 go\_ans.txt。古典程式接著依序讀取檔案並執行後續推論: 若  $can(go(desk, car, walking))$  成立, 則得出  $did(go(desk, car, walking))$ , 進而得出  $at(I, car)$ 。隨後觸發 R4, 推導出  $can(go(home, airport,$

$driving))$ , 再觸發 R5 得到  $did(go(home, airport, driving))$ 。最終滿足 R6 條件, 成功完成最後的驗證並得出  $at(I, airport)$  的最終結論。

### V. 結論

本研究成功開發了一套量子與古典混合電路方法, 並以「我坐在家裡書桌前, 想去機場」等句子作為常識推理的概念驗證, 完整展示了系統演繹的每一個步驟。本實驗於 IBM 量子模擬器上成功執行, 並準確推導出「走到車旁並開車前往機場」的最終結論。

儘管目前的實作仍有其侷限性 (如使用的量子位元數量較少), 且在知識表示上, 本研究現階段並不追求自然語言語義的完整解析, 而是以「可計算性 (Computability)」為首要考量。系統將已知句型手動轉譯為結構化謂詞, 藉由簡化語意理解的過程, 確保了後續量子電路設計與邏輯驗證的明確性。有別於當前致力於計算詞嵌入 (Word Embeddings) 或估計數億個參數的深度學習黑箱模型, 本研究的混合架構採取了直觀且具備完美邏輯可解釋性的方法。在大型語言模型蓬勃發展的今日, 本策略不僅成功作為概念驗證 (PoC), 更展示了量子計算在人工智慧底層邏輯檢索中應用的潛力。

### REFERENCES

- [1] McCarthy J. Programs with common sense. *The Symposium on the Mechanization of Thought Processes*, National Physical Laboratory, Teddington, England, pp. 1-15, November 23-27, 1958. (Published in Proceedings of the Symposium by H. M. Stationery Office).
- [2] McCarthy, J. "Recursive Functions of Symbolic Expressions and Their Computation by Machine, Pt I". *Communications of the ACM*, 3 (4): 184-195, April 1960.
- [3] Turing. A. M. "Computing Machinery and Intelligence". *Mind*, LIX (253): 433-460, 1950.
- [4] Minsky M. and Papert S. *Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry*, the MIT Press, ISBN electronic: 9780262343930, 2017.
- [5] Newell, A., Simon H. A. and Shaw Cliff. "The logic theory machine--A complex information processing system". *IRE Transactions on Information Theory*, Volume: 2, Issue: 3, Page(s): 61 - 79, September 1956.
- [6] Feynman, R.P. In Miniaturization. In Gilbert, D.H. ed., Reinhold Publishing Corporation, New York, pp. 282-296, 1961.
- [7] L. Adleman, "Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems". *Science*, vol. 266, pp. 1021-1024, 1994.
- [8] Feynman, R. "Simulating Physics with Computers". *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6/7), pp. 467-488, 1982.
- [9] Turing, A.M. On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungs problem. *Proceedings of the London Mathematical Society*, s2-42(1), pp. 230-265, 1937.
- [10] Benioff, P. "Quantum Mechanical Models of Turing Machines That Dissipate No Energy". *Physical Review Letter*, 48, pp. 1581-1585, 1982.

- [11] Deutsch, D. Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 400, pp. 97-117, 1985.
- [12] Deutsch, D. and Jozsa, R. Rapid Solutions of Problems by Quantum Computation. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, 439, pp. 553-558, 1992.
- [13] Shor, P.W. Algorithm for Quantum Computation: Discrete Logarithm and Factoring Algorithm. In *Proceedings of the 35th Annual IEEE Symposium on Foundation of Computer Science*, (Santa Fe, NM, USA), pp. 123-134, 1994.
- [14] Grover, L. K. A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search. In *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, (Philadelphia, PA, USA), ACM, pp. 212-219, 1996.
- [15] Chang, W.-L. and Vasilakos, A.V. *Fundamentals of Quantum Programming in IBM's Quantum Computers*, *Studies in Big Data*, Volume Number: 81, Springer, ISBN: 978-3-030-63582-4, January 2021.
- [16] Arute F., Arya K., Babbush R., Bacon D., Bardin J. C., Barends R., Biswas R., Boixo S., Fernando G., Brandao S. L., Buell D. A., Burkett B., Chen Y., Chen Z., Chiaro B., Collins R., Courtney W., Dunsworth A., Farhi E., Foxen B., Fowler A., Gidney C., Giustina M., Graff R., Guerin K., Habegger S., Harrigan M. P., Hartmann M. J., Ho A., Hoffmann M., Huang T., Humble T. S., Isakov S. V., Jeffrey E., Jiang Z., Kafri D., Kechedzhi K., Kelly J., Klimov P. V., Knysh S., Korotkov A., Kostritsa F., Landhuis D., Lindmark M., Lucero E., Lyakh D., Mandrà S., McClean J. R., McEwen M., Megrant A., Mi X, Michielsen K., Mohseni M., Mutus J., Naaman O., Neeley M., Neill C., Niu M. Y., Ostby E., Petukhov A., Platt J. C., Quintana C., Rieffe E. G., Roushan P., Rubin N. C., Sank D., Satzinger K. J., Smelyanskiy V., Sung K. J., Trevithick M. D., Vainsencher A., Villalonga B., White T., Yao Z. J., Yeh P., Zalcman A., Neven H. and Martinis J. M. "Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor". *Nature*, volume 574, pages 504-510, 23 October 2019.
- [17] Nielsen, M.A. and Chuang, I.L. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, New York, NY, 2000.
- [18] Imre, S. and Balazs, F. *Quantum Computation and Communications: An Engineering Approach*. John Wiley & Sons Ltd., UK, 2007.
- [19] Lipton R. J. and Regan K. W. *Quantum Algorithms via Linear Algebra: a Primer*. The MIT Press, 2014, ISBN 978-0-262-02839-4, 2014.
- [20] Zeng W. and Coecke B. "Quantum Algorithms for Compositional Natural Language Processing". In *Proceedings SLPCS 2016*, pp. 67-75, arXiv:1608.01018.
- [21] Nausheen F., Ahmed K. and Khan M. I. "Quantum Natural Language Processing: A Comprehensive Review of Models, Methods, and Applications". arXiv:2504.09909v1.