



| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|  | VIETTEL AI RACE | TD088 |
| | Máy Tính Sinh Học (Biocomputing) Dựa Trên DNA Và Ứng Dụng Trong Y Sinh Học Hệ Hệ Tiếp Theo | Lần ban hành: 1 |

Tế bào gốc trong cơ thể người xử lý thông tin di truyền với độ tin cậy và tốc độ vượt trội. Để làm được điều này, chúng tiếp cận các đoạn DNA cụ thể trong nhân tế bào. Các nhà nghiên cứu tại Viện Công nghệ Karlsruhe (KIT) đã nghiên cứu cách thức hoạt động của quá trình xử lý thông tin dựa trên DNA. Kết quả của họ cho thấy quá trình này tương đương với các quy trình trong máy tính hiện đại và do đó có thể được dùng làm mô hình cho các chip máy tính mới dựa trên DNA. Bài báo được công bố trên Biên niên sử của Viện Hàn lâm Khoa học New York. (DOI: 10.1111/nyas.15415)

Tế bào người chứa khoảng 20.000 gen trên một chuỗi DNA dài hai mét - được cuộn chặt trong một nhân tế bào có kích thước khoảng mười micromet. Để so sánh, kích thước này tương đương với một sợi chỉ dài 40 km được nhét vào một quả bóng đá. Bất chấp không gian hạn chế này, tế bào gốc vẫn có thể tìm và kích hoạt đúng gen chỉ trong vài phút. Những gen này khác nhau tùy theo từng tế bào. Việc kích hoạt chính xác là rất quan trọng, vì sai sót trong việc lựa chọn gen có thể dẫn đến bệnh tật hoặc chết tế bào.

Các nghiên cứu của các nhà nghiên cứu KIT đã chỉ ra rằng ngưng tụ sinh học phân tử cho phép kích hoạt nhanh chóng nhưng đáng tin cậy các gen chính xác. "Ngưng tụ sinh học phân tử là những giọt nhỏ hình thành tại các vị trí cụ thể trên DNA – tương tự như những giọt nước đọng trên gương phòng tắm sau khi tắm nước nóng – và hoạt động giống như dầu trong nước", Giáo sư Lennart Hilbert từ Viện Hệ thống Sinh học và Hóa học KIT (IBCS) giải thích. "Chúng chứa các cỗ máy phân tử, tức là một tập hợp các phân tử cụ thể cần thiết cho việc kích hoạt gen." Quá trình này gợi nhớ đến một nguyên lý cốt lõi của khoa học máy tính làm nền tảng cho máy tính và điện thoại thông minh hiện đại: kiến trúc Von Neumann. Trong kiến trúc này, một bộ xử lý duy nhất có thể truy cập rất nhanh vào một địa chỉ duy nhất trong bộ nhớ lớn, thường được gọi là RAM. Các nhà nghiên cứu hiện muốn chuyển giao nguyên lý này sang các chip máy tính nhân tạo dựa trên DNA để có thể kiểm soát, ví dụ, các ứng dụng công nghệ sinh học và y sinh.

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|  | VIETTEL AI RACE | TD088 |
| | Máy Tính Sinh Học (Biocomputing) Dựa Trên DNA Và Ứng Dụng Trong Y Sinh Học Thế Hệ Tiếp Theo | Lần ban hành: 1 |

1. Giới thiệu

Trong nhiều thập kỷ, ngành công nghệ thông tin phụ thuộc vào **silicon** và định luật Moore. Tuy nhiên, khi kích thước transistor chạm tới giới hạn vật lý, các nhà khoa học tìm đến những phương pháp tính toán hoàn toàn mới. **Máy tính sinh học dựa trên DNA** nổi lên như một bước ngoặt, khai thác khả năng lưu trữ và xử lý thông tin tự nhiên của phân tử sinh học.

DNA – với khả năng lưu trữ dữ liệu cực lớn và tự nhân bản – mở ra viễn cảnh các “máy tính sống” hoạt động bên trong tế bào, thực hiện tính toán, ra quyết định và thậm chí tự sửa chữa. Đây là nền tảng cho y học cá nhân hóa, công nghệ gene và các hệ thống thông minh có thể hoạt động ngay bên trong cơ thể con người.


2. Máy tính sinh học: Định nghĩa và ý nghĩa

Máy tính sinh học (hay còn gọi là máy tính hữu cơ) là một lĩnh vực nghiên cứu đang phát triển, tập trung vào việc sử dụng các thành phần sinh học, như tế bào, protein, DNA để tạo ra các hệ thống tính toán. Nói một cách đơn giản, thay vì dựa vào các linh kiện điện tử như silicon, máy tính sinh học sử dụng các vật liệu và cơ chế của thế giới tự nhiên.

3. Ưu điểm vượt trội của máy tính sinh học

So với máy tính truyền thống, máy tính sinh học sở hữu nhiều lợi thế độc đáo:

- **Hiệu năng vượt trội:** Các tế bào thần kinh có thể hoạt động với tốc độ và hiệu quả cao hơn nhiều so với các vi mạch silicon. Điều này hứa hẹn tạo ra những máy tính với khả năng xử lý thông tin nhanh hơn, tiết kiệm năng lượng hơn.
- **Khả năng tự sửa chữa:** Tế bào sống có khả năng tự tái tạo và sửa chữa các hư hỏng. Điều này giúp máy tính sinh học trở nên bền bỉ hơn, ít bị lỗi hỏng hơn so với máy tính truyền thống.

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|  | VIETTEL AI RACE | TD088 |
| | Máy Tính Sinh Học (Biocomputing) Dựa Trên DNA Và Ứng Dụng Trong Y Sinh Học Thế Hệ Tiếp Theo | Lần ban hành: 1 |

- **Linh hoạt và thích nghi:** Máy tính sinh học có thể được thiết kế để thích nghi với các môi trường khắc nghiệt và biến đổi, điều mà các máy tính silicon khó có thể làm được.


4. Nguyên lý cơ bản

- **Đại diện dữ liệu:** Chuỗi nucleotide A, T, C, G của DNA đóng vai trò như “bit” sinh học, mỗi cặp base có thể mã hóa thông tin nhị phân.
- **Xử lý thông tin:** Phản ứng hóa học như lai ghép (hybridization), tách chuỗi, hoặc enzyme cắt DNA đóng vai trò như các cổng logic (AND, OR, NOT).
- **Tính toán song song tự nhiên:** Hàng tỷ phân tử DNA trong một ống nghiệm có thể thực hiện hàng tỷ phép tính đồng thời – khả năng song song vượt xa máy tính truyền thống.
- **Tự nhân bản và sửa lỗi:** Khả năng sao chép của DNA cho phép nhân rộng dữ liệu và tự sửa chữa, nâng cao độ bền.

5. Ưu thế nổi bật

- **Mật độ lưu trữ khổng lồ:** 1 gram DNA có thể lưu trữ khoảng 215 petabyte dữ liệu – gấp hàng triệu lần ổ cứng hiện nay.
- **Tiêu thụ năng lượng thấp:** Phản ứng hóa sinh tiêu tốn ít năng lượng hơn nhiều so với siêu máy tính.
- **Độ bền vượt thời gian:** DNA có thể tồn tại hàng nghìn năm nếu bảo quản đúng điều kiện.
- **Tính chất sinh học tự nhiên:** Có thể tương tác trực tiếp với môi trường sinh học, đặc biệt phù hợp cho ứng dụng y học.

6. Ứng dụng trong y sinh học

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|  | VIETTEL AI RACE | TD088 |
| | Máy Tính Sinh Học (Biocomputing) Dựa Trên DNA Và Ứng Dụng Trong Y Sinh Học Thế Hệ Tiếp Theo | Lần ban hành: 1 |


- **Chẩn đoán bệnh tại chỗ:** Máy tính DNA bên trong tế bào có thể phát hiện dấu hiệu bệnh (ví dụ: nồng độ protein, RNA đặc hiệu) và phát tín hiệu cảnh báo sớm.
- **Điều trị chính xác:** Khi phát hiện tế bào ung thư, hệ thống DNA có thể giải phóng thuốc hoặc kích hoạt cơ chế tự hủy của tế bào bệnh.
- **Theo dõi liên tục:** Các “sensor sinh học” chạy bằng DNA có thể giám sát nồng độ đường, hormone, hoặc chỉ số miễn dịch theo thời gian thực.
- **Lưu trữ hồ sơ y tế:** DNA nhân tạo có thể lưu trữ lịch sử điều trị, xét nghiệm, và thông tin gen của bệnh nhân ngay trong cơ thể.

7. Các thành tựu nghiên cứu nổi bật

- **DNA Storage của Microsoft & University of Washington:** Lưu trữ dữ liệu số vào DNA nhân tạo và giải mã lại với độ chính xác cao.
- **Máy tính DNA của Caltech:** Sử dụng phản ứng enzyme để giải bài toán logic phức tạp trong ống nghiệm.
- **DNA Origami Nanorobot:** Robot nano bằng DNA có thể vận chuyển thuốc và mở ra khi gặp tín hiệu phân tử đặc hiệu.

8. Thách thức triển khai

- **Tốc độ tính toán:** Dù xử lý song song mạnh mẽ, thời gian phản ứng hóa học vẫn chậm so với điện tử học tốc độ cao.
- **Độ chính xác và sai số:** Lỗi lai ghép hoặc đột biến có thể gây sai kết quả.
- **Chi phí tổng hợp DNA:** Dù giảm nhanh, hiện vẫn cao cho ứng dụng quy mô lớn.
- **An toàn sinh học:** Cần kiểm soát nghiêm ngặt để tránh rủi ro sinh học và lây nhiễm.
- **Chuẩn hóa và tích hợp:** Chưa có chuẩn chung để kết nối máy tính DNA với hệ thống điện tử truyền thống.

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
|  | VIETTEL AI RACE | TD088 |
| | Máy Tính Sinh Học (Biocomputing) Dựa Trên DNA Và Ứng Dụng Trong Y Sinh Học Thế Hệ Tiếp Theo | Lần ban hành: 1 |

9. Tương lai và xu hướng

- **Hybrid Bio-Electronic Systems:** Kết hợp vi mạch silicon với DNA để tận dụng cả tốc độ điện tử và mật độ lưu trữ sinh học.
- **Y học cá nhân hóa:** Máy tính DNA hoạt động trong cơ thể để phát hiện và điều trị bệnh theo thời gian thực, giảm nhu cầu nhập viện.
- **Tính toán lượng tử sinh học:** Nghiên cứu sự giao thoa giữa cơ học lượng tử và phản ứng sinh học để tăng tốc tính toán.
- **Sản xuất quy mô lớn:** Công nghệ tổng hợp DNA tự động và giá rẻ sẽ đưa biocomputing vào các ứng dụng công nghiệp và thương mại.