

# 連線不是纜線

v0.1 / 2026-07-30 / Neo.K / 通訊架構論文／混合鏈路與斷線治理規格

證據狀態：E0——形式模型、協議架構與 MVP 驗證路線

<https://thisoneisneok.com/html/papers/stdi-08.html>

---

## SECTION

### 有線、無線、光學與離線任務包的混合站網

Connection Is Not a Cable: A Hybrid Station Fabric of Wired, Wireless, Optical, and Offline Mission Bundles

系列：《時空域支配智能》系列第 8 篇

文件編號：EML-STD1-HLF-2026-v0.1

作者：Neo.K

協作整理：Aletheia（阿萊）

機構：EveMissLab／一言諾科技有限公司

日期：2026 年 7 月 30 日

文件類型：通訊架構論文／混合鏈路與斷線治理規格

證據成熟度：E0——形式模型、協議架構與 MVP 驗證路線

公開狀態：私人研究稿；公開前應經 EML-CF 的 IP Gate、安全、來源與通訊合規審查

上位理論：STDI | 時空域支配智能

直接前序：

- 《時空間支配型 AI：從單體具身智能到持續性時空域治理》

- 《超靈的物理化：從 O-Chip 維度代理人到分布式具身主體》
- 《Oversoul Station Fabric：固定站、移動站與虛擬站的分布式具身網路》
- 《持續性指揮控制區：AI 如何佔據、維持並安全解除一個物理時空域》
- 《語義即物理路由：從資料流治理到物料、能源、站點與行動流治理》
- 《具身即佔域，對齊即能力：分布式身體的時序容量、協調稅與規模邊界》
- 《中央主權、地方自治與動態不動點中央》

## SECTION

### 摘要

分布式具身智能常被想像成「中央 AI 透過網路控制許多機器」。這種描述容易將網路視為透明、連續且同質的管道，彷彿只要設備具有 IP 位址、無線訊號或某條纜線，就能承擔相同的控制責任。然而，物理站網中的通訊條件高度異質：本地馬達與安全互鎖需要微秒至毫秒級的確定性；跨站樣本交接需要有界延遲、時間同步與高可靠度；移動機器人需要可漫遊的無線連線；顯微影像與模型檔案可能需要高吞吐光學或有線鏈路；遠端、深海、軌道或災害環境則可能只有間歇連線，必須依靠可儲存、攜帶與轉送的任務包。

本文提出：

連線不是纜線。

「連線」不是某條物理媒介持續存在，而是站點、治理中心與任務之間，仍維持可驗證身份、有效權限、可接受世界紀元、明確消息新鮮度、可用回報路徑與安全降級規則的邏輯關係。纜線、無線電、可見光、紅外線、移動載體與離線儲存只是承載這段關係的不同媒介。

本文將此架構命名為 Hybrid Link Fabric (HLF，混合鏈路織網)，作為 Oversoul Station Fabric 的通訊與時間平面。HLF 的基本形式為：

cal-H\_(HLF)

=

(

cal-N,

cal-L,

cal-P,

cal-Q,



---

其中：

- cal-N：OSF 站點；
- cal-L：實體與邏輯鏈路；
- cal-P：可行路徑與多重連線；
- cal-Q：服務品質與控制關鍵度；
- cal-T：時間同步、時間不確定性與 holdover；
- cal-S：身份、完整性、機密性與防重放；
- cal-B：離線任務包與儲存轉送；
- cal-E：鏈路事件、證據與故障紀錄。

本文區分六類鏈路：

- L0 本地硬安全鏈路；
- L1 確定性有線鏈路；
- L2 一般操作與資料鏈路；
- L3 移動無線鏈路；
- L4 光學與光通訊鏈路；
- L5 延遲容忍與離線任務包鏈路。

同時區分五類控制流：

- K☒：硬安全與立即停止；
- K☒：即時閉環與精密同步；
- K☒：站點操作、交接與狀態；
- K☒：治理、研究、模型與批次資料；
- K☒：延遲容忍任務、證據與遠端同步。

鏈路類型與控制流不能隨意互換。無線連線可支援大量移動與操作任務，但不能因標稱低延遲就自動承擔硬體安全；光學鏈路可提供高資料能力與頻譜隔離，卻受視距、遮擋、對準和環境影響；離線任務包能維持治理關係，卻不能承擔需要即時撤銷的不可逆動作。

本文建立 Link Descriptor、Path Contract、Time Contract、Freshness Budget、Multi-Homing Policy、Failover Epoch、Mission Bundle、Link Degradation State 與 Reconnection Reconciliation 等核心物件。其中心原則是：

### 【控制責任必須依鏈路能力降級，而不是假裝所有鏈路等價】

現有技術已提供可組合的底座。IEEE 802.1 TSN 以有界延遲、低延遲變異與低丟包為確定性網路目標；IEEE 802.1AS 管理時間敏感應用的同步，並處理網路元件加入、移除、故障和重配置；IEEE 802.1CB 提供幀複製、冗餘傳送與重複消除。3GPP 已建立 5G 與 TSN、時間同步和時間敏感通訊的整合機制。DDS 和 ROS 2 提供可靠度、deadline、lifespan、liveliness、durability 等 QoS 控制。IEEE 802.11bb 已將光通訊納入 802.11，而 P802.11br 正在延伸增強型光通訊。IETF Bundle Protocol v7 以 store-carry-forward 疊加網路支援間歇連線、長延遲和高錯誤率環境，BPsec 則提供 bundle 的完整性與機密性保護。

HLF 不試圖以一種新鏈路取代所有既有標準。它新增的是一個上層治理映射：

任務語義與風險

→

控制關鍵度

→

鏈路契約

→

路徑與備援

→

降級和離線策略。

本文的核心命題為：

一個站點即使暫時沒有纜線、沒有無線訊號或沒有即時回程，也可能在有限租約與任務包內保持治理連續；反之，一個訊號滿格且封包可達的站點，若權限過期、世界紀元失效或資料已不新鮮，也已經失去有效連線。

關鍵詞：連線不是纜線、Hybrid Link Fabric、HLF、混合站網、有線、無線、光學通訊、離線任務包、TSN、5G TSN、IEEE 802.11bb、Bundle Protocol、DTN、QoS、時間同步、多重連線、failover、fencing、站點治理

---

前七篇已建立：

- STDI 的時空域治理；
- 多身體超靈；
- OSF 站點；
- PCD 持續存在；
- SPR 物理路由；
- EAC 對齊容量；
- DFC 中央與地方治理。

但仍有一個未處理的假設：

站點之間始終有一條可用、低延遲、可信且一致的網路。

真實物理域中可能同時存在：

- 安全 PLC 與本地總線；
- TSN Ethernet；
- 一般 Ethernet；
- Wi-Fi；
- 私有 5G；
- UWB 或短距無線；
- 光纖；
- 可見光或紅外線；
- 移動儲存；
- 長延遲 DTN；
- 完全離線任務包。

---

本篇的任務不是選出「最好的網路」，而是建立：

不同控制責任如何被安全地映射到不同鏈路，並在鏈路退化、切換或消失時維持治理邊界。

## SECTION

### 1.1 物理可達不等於治理可達

若站點可以 ping 通，但：

- 憑證無效；
- 租約過期；
- 治理紀元落後；
- 世界狀態過期；
- 消息超過 lifespan；
- 站點已被隔離；

則：

PhysicallyReachable=1,

GovernanceConnected=0.

## SECTION

### 1.2 沒有即時鏈路也可能維持有限治理

若遠端站點持有：

- 已簽章任務包；
- 世界狀態快照；
- 短期權限租約；

- 本地安全包絡；
- 明確到期時間；
- 回報與補償規則；

則在短期內：

Online=0,

GovernanceContinuity=1.

## SECTION

### 1.3 連線契約

定義站點  $i$  與治理域之間的邏輯連線：

$$X_i(t) = (I_i, G_i, W_i, A_i, F_i, R_i),$$

其中：

- $I_i$ ：身份可驗證；
- $G_i$ ：治理紀元可接受；
- $W_i$ ：世界狀態新鮮度；
- $A_i$ ：權限與租約；

- 
- F $\boxtimes$ ：前向與回報鏈路能力；
  - R $\boxtimes$ ：失聯、恢復與撤銷規則。

只有這些條件成立，站點才處於有效治理連線。

## SECTION

### 2.1 L0：本地硬安全鏈路

用途：

- 急停；
- 馬達電流；
- 碰撞；
- 雷射互鎖；
- 高壓；
- 壓力；
- 熱失控；
- 安全門。

特徵：

- 微秒至毫秒；
- 通常不經雲端；
- 不依賴跨站路由；
- 必須能在上層網路全部失效時工作。

可能使用：

- 專用硬線；

- 
- 安全 PLC ；
  - 工業現場總線 ；
  - 本地 MCU ；
  - 獨立互鎖 。

HLF 不對 L0 做高階替代，只記錄其狀態與否決結果。

## SECTION

# 2.2 L1：確定性有線鏈路

用途：

- 精密同步 ；
- 機械交接 ；
- 儀器觸發 ；
- 時間敏感控制 ；
- 高可靠站點協調 。

特徵：

- 有界延遲 ；
- 低抖動 ；
- 流量排程 ；
- 冗餘 ；
- 時間同步 。

候選底座包括：

- TSN Ethernet ；

- 
- 工業 Ethernet ；
  - 專用光纖 ；
  - 其他經驗證的確定性網路 。

## SECTION

### 2.3 L2：一般操作與資料鏈路

用途：

- ROS 2 Topic／Service／Action ；
- DDS data space ；
- OPC UA ；
- 站點遙測 ；
- 一般任務 ；
- 影像與資料 。

特徵：

- 可設定可靠度、deadline、lifespan、durability 和 liveliness ；
- 不保證所有端到端物理期限 ；
- 適合站點操作和資料交換 。

## SECTION

### 2.4 L3：移動無線鏈路

用途：

- AMR／AGV ；
- 無人機 ；

- 
- 移動感測；
  - 穿戴設備；
  - 臨時站；
  - 重新配置空間。

候選包括：

- Wi-Fi；
- 私有 5G；
- UWB；
- 短距無線；
- 專用 RF。

特徵：

- 覆蓋和吞吐隨位置變化；
- 可能漫遊、遮蔽、干擾；
- 能支援時間敏感服務，但必須按部署條件驗證；
- 不應默認承擔 L0。

## SECTION

# 2.5 L4：光學與光通訊鏈路

用途：

- 高吞吐影像與科學資料；
- 電磁敏感環境；
- 定向安全區；

- 
- 移動對接；
  - 空間與遠距資料傳輸。

形式包括：

- 光纖；
- 可見光通訊；
- 紅外線；
- free-space optical；
- 雷射通訊。

優點：

- 高資料能力；
- 可與 RF 頻譜分離；
- 空間方向性；
- 光纖具有良好隔離性。

限制：

- 視距；
- 遮擋；
- 指向、捕獲與追蹤；
- 污染、煙霧、雲層或環境干擾；
- 光學安全；
- 移動對準成本。

## SECTION

## 2.6 L5：延遲容忍與離線任務包

---

用途：

- 間歇連線；
- 遠端基地；
- 深海；
- 軌道；
- 災害環境；
- 跨組織離線資料室；
- 人工攜帶資料。

特徵：

- store-carry-forward；
- 高延遲；
- 非即時；
- 需要到期和重放保護；
- 任務和證據必須自包含；
- 無法依賴即時撤銷。

## SECTION

### K☒：硬安全

要求：

- 最小延遲；
- 本地確定性；
- 獨立供電或安全失效；

- 
- 不允許經 L5 ；
  - 不允許依賴遠端 AI 。

#### SECTION

### K $\boxtimes$ ：即時閉環與同步

例：

- 精密伺服 ；
- 多站同步觸發 ；
- 協同搬運 。

偏好：

- L0／L1 ；
- 經驗證的 L3 或 L4 只能作特定部署下的補充 。

#### SECTION

### K $\boxtimes$ ：站點操作與交接

例：

- ROS 2 Action ；
- 樣本交接 ；
- 任務狀態 ；
- 移動交通 。

可使用：

- L1／L2／L3 ；
- 必須有 deadline、freshness 和 failover 。

---

## SECTION

### K $\boxtimes$ ：治理、模型與高吞吐資料

例：

- 世界模型同步；
- 影像；
- 模型更新；
- EML-CF；
- 研究資料。

可使用：

- L2／L3／L4；
- 可緩衝、壓縮和重傳。

## SECTION

### K $\boxtimes$ ：延遲容忍任務與證據

例：

- 遠端任務包；
- 批次證據；
- 長延遲同步；
- 離線更新。

可使用：

- L5；
- 必須自包含、可驗證和可到期。

控制類別 L0 L1 L2 L3 L4 L5

K☑ 硬安全 核心 輔助 禁止作唯一鏈路 禁止作唯一鏈路 禁止作唯一鏈路 禁止

K☑ 即時同步 可用 核心 有條件 經驗證後 經驗證後 禁止

K☑ 站點操作 — 可用 核心 核心 有條件 僅非即時

K☑ 治理與資料 — 可用 核心 可用 核心／可用 可緩衝

K☑ 延遲容忍 — 可用 可用 可用 可用 核心

此表不是普世認證，而是 HLF 的保守預設。實際部署仍需依：

- 延遲；
- 抖動；
- 丟包；
- 覆蓋；
- 安全等級；
- 終端能力；

進行驗證。

每條鏈路 l 表示為：

l  
=  
(  
m,  
d,  
j,  
p,  
b,  
r,  
f,  
s,  
e,  
v



---

其中：

- m：媒介；
- d：延遲區間；
- j：抖動；
- p：丟包和錯誤；
- b：吞吐；
- r：可靠度與冗餘；
- f：新鮮度與消息期限；
- s：身份、完整性、機密性；
- e：能源成本；
- v：可見性、移動性和環境限制。

## SECTION

### 5.1 最小描述

link:

id: "hlf:lab-a:wifi-01"

medium: "wireless\_rf"

technology: "private\_wifi"

endpoints:

- "osf:amr-02"

- "osf:edge-gateway-01"

performance:

latency\_budget\_ms: 30

jitter\_budget\_ms: 10

loss\_budget: 0.01

bandwidth\_mbps: 200

semantics:

supported\_classes: ["K2", "K3"]

forbidden\_classes: ["K0"]

maximum\_message\_age\_ms: 500

offline\_fallback: "local\_safe\_mission"

---

```
security:
  mutual_authentication: true
  encryption: true
  replay_protection: true
mobility:
  roaming: true
  coverage_zones: ["lab-a", "corridor-1"]
```

## SECTION

# 5.2 描述不等於實測

Link Descriptor 是設計契約。

運行時仍需收集：

- 實際延遲；
- 實際丟包；
- 訊號；
- 漫遊；
- 時鐘偏差；
- 斷線；
- 安全事件。

任務流  $f$  的路徑契約：

```
 $\pi_f$ 
=
(
  K_f,
  D_f,
  J_f,
  R_f,
  F_f,
  S_f,
  T_f,
  B_f
```



---

其中：

- $K_f$ ：控制關鍵度；
- $D_f$ ：最大延遲；
- $J_f$ ：抖動；
- $R_f$ ：可靠度；
- $F_f$ ：最大消息年齡；
- $S_f$ ：安全需求；
- $T_f$ ：時間同步；
- $B_f$ ：失效和備援策略。

路徑可由多條鏈路組成：

$$P_f = (l_1, l_2, \dots, l_n).$$

端到端契約不能只看其中一段。

## SECTION

# 7.1 DDS 與 ROS 2 QoS

可配置：

- reliability；
- durability；
- deadline；
- lifespan；
- liveliness；

- history ；
- resource limits 。

這些能力對站點資料和任務非常重要。

## SECTION

### 7.2 仍需端到端驗證

即使 Topic 設為 reliable ：

- 應用程式可能延遲 ；
- 執行器可能排隊 ；
- 世界狀態可能過期 ；
- 命令可能已失去權限 ；
- 物理機構可能故障 。

所以：

Reliable Delivery

≠

Timely Safe Effect.

## SECTION

### 7.3 服務的舊請求

具有副作用的 Service 或 Action 必須帶：

- command ID ；
- governance epoch ；
- deadline ；

- idempotency key ;
- world epoch ;
- fencing token ◦

避免重啟後重新執行過期命令 ◦

消息  $m$  的有效條件：

$$\begin{aligned} & \text{Fresh}(m, t) \\ &= \\ &1 \\ &[ \\ & t - t_{\text{source}} \\ &\leq \\ & \Delta_m^{\text{max}} \\ &]. \end{aligned}$$

## SECTION

### 8.1 不同消息不同期限

消息 典型語義

急停與人員存在 極短

機器人姿態 短

任務狀態 秒級或任務級

儀器校準 依校準政策

模型檔案 版本固定

遠端研究報告 長

## SECTION

### 8.2 過期不一定丟棄

過期消息可：

- 保存為歷史證據；
- 禁止作為當前控制；
- 觸發重新觀測；
- 進入調和流程。

SECTION

9.1 同步不是普通資料

精密協作需要：

- 共同時間；
- 可估計偏差；
- 來源與失效狀態；
- holdover。

SECTION

9.2 Time Contract

$$\tau_{\Box} = (c_{\Box}, \epsilon_{\Box}, u_{\Box}, h_{\Box}, s_{\Box}),$$

---

其中：

- $c_{\text{ref}}$ ：時鐘來源；
- $\epsilon_{\text{ref}}$ ：誤差界；
- $u_{\text{ref}}$ ：更新頻率；
- $h_{\text{ref}}$ ：失去來源後 holdover；
- $s_{\text{ref}}$ ：同步狀態。

#### SECTION

## 9.3 IEEE 802.1AS

可作時間敏感站網的同步底座之一，並處理網路元件加入、移除、故障和重配置時的同步維持。

#### SECTION

## 9.4 無線與 5G 時間

3GPP 的工業 5G 工作已支援 TSN 整合、時間同步和時間敏感通訊。

但部署仍需量測：

- 空口延遲；
- 排程；
- 漫遊；
- 覆蓋；
- 時鐘路徑；
- trust domain。

#### SECTION

## 9.5 Holdover

---

同步來源中斷後，站點可以在有限時間依本地時鐘維持。

若：

$$\begin{aligned} \epsilon_{\text{max}}(t) \\ > \\ \epsilon_{\text{max}}, \end{aligned}$$

精密同步任務必須停止或降級。

## SECTION

# 10.1 TSN

TSN 的目標是透過 IEEE 802 網路提供：

- 有界延遲；
- 低延遲變異；
- 低丟包；
- 時間敏感服務。

HLF 可將 TSN 用於：

- 站點觸發；
- 同步量測；
- 關鍵操作資料；
- 時間分配。

## SECTION

# 10.2 Frame Replication and Elimination

IEEE 802.1CB 提供：

- 幀識別；
- 多路複製；
- 冗餘傳送；
- 重複消除。

這可降低單一路徑故障造成的丟失。

## SECTION

### 10.3 不重複計算容量

若同一幀經兩條路徑複製：

Delivered Information=1,

不是 2。

冗餘增加可靠度，但消耗額外頻寬。

## SECTION

### 10.4 無縫不等於無故障

即使使用冗餘：

- 兩條路徑可能共享交換器；
- 共享電源；
- 共享時間源；
- 配置錯誤；
- 接收端故障。

需建立失效域圖。

## SECTION

### 11.1 無線的不可替代價值

- 移動；
- 快速重配置；
- 臨時站；
- 跨房間；
- 減少拖纜；
- 人員與穿戴裝置。

## SECTION

### 11.2 無線容量是位置函數

```
C_(wireless)
=
f(
z,
t,
i,
o,
m,
p
),
```

其中：

- $z$ ：位置；
- $t$ ：時間；

- 
- i：干擾；
  - o：遮蔽；
  - m：漫遊和調變；
  - p：功率與政策。

#### SECTION

## 11.3 5G 與 TSN

5G 系統可以作為整合 TSN 的邏輯橋梁並提供時間敏感通訊與時間同步服務，但不代表所有 5G 部署都自動滿足相同的確定性。

#### SECTION

## 11.4 Wi-Fi

適合：

- 高吞吐移動資料；
- 一般控制；
- 影像；
- 臨時設備。

需要：

- 覆蓋量測；
- 漫遊測試；
- 頻道與干擾管理；
- 重要流量優先；
- 斷線地方策略。

---

## SECTION

### 11.5 多無線鏈路

移動站可同時具有：

- Wi-Fi ；
- 5G ；
- 短距對接鏈路 ；
- 本地離線任務包 。

但多鏈路不應讓同一命令被重複執行 。

## SECTION

### 12.1 光纖

適合：

- 高吞吐 ；
- 長距 ；
- 電磁隔離 ；
- 穩定固定站點 。

## SECTION

### 12.2 Light Communications

IEEE 802.11bb 已將光通訊納入 802.11 系列 ； P802.11br 正在研究增強型光通訊 。

可用於：

- 室內高吞吐 ；

- RF 受限區；
- 空間定向鏈路；
- 特定移動站對接。

#### SECTION

## 12.3 Free-Space Optical/Laser Communication

NASA 的光通訊實作證明紅外線與雷射鏈路可承擔高資料量，但也需要精密指向，並受到大氣、雲層、遮擋和追蹤條件影響。

#### SECTION

## 12.4 光學鏈路狀態

ACQUIRING

TRACKING

LOCKED

DEGRADED

OBSCURED

LOST

#### SECTION

## 12.5 光學不應單獨承擔不可中斷控制

若光學鏈路被遮擋，站點應：

- 切換 RF/有線；
- 降級；
- 本地完成安全步驟；
- 暫停高風險任務。

#### SECTION

## 13.1 定義

站點同時具有路徑集合：

$$\begin{aligned} \text{cal-}P &= \\ &\{P^{(1)}, P^{(2)}, \dots, P^{(k)}\}. \end{aligned}$$

## SECTION

### 13.2 策略

- Active／Standby；
- Active／Active；
- 流分類；
- 冗餘複製；
- 負載分散；
- 僅證據批次轉移。

## SECTION

### 13.3 路徑選擇

$$\begin{aligned} P_f^* &= \\ &\operatorname{argmin}_{P \in \text{cal-}P_f} \\ &(\quad \\ &w_{dD_P} \\ &+ \\ &w_{J_P} \\ &+ \\ &w_{lL_P} \\ &+ \\ &w_{eE_P} \\ &+ \end{aligned}$$



---

其中 R\_P 可表示風險，不是可靠度。

## SECTION

### 13.4 不以吞吐最大為唯一目標

高吞吐路徑可能：

- 延遲不穩；
- 信任域不同；
- 能耗高；
- 不允許機密資料；
- 不支援時間同步。

## SECTION

### 14.1 切換狀態機

PRIMARY\_ACTIVE  
DEGRADING  
SECONDARY\_PREPARE  
DUAL\_PATH\_VERIFY  
SECONDARY\_COMMIT  
PRIMARY\_RELEASE  
RECOVERY

## SECTION

### 14.2 切換前檢查

- 新路徑身份；
- 路徑契約；
- 治理紀元；
- 時間狀態；

- QoS；
- 安全；
- 消息序號。

## SECTION

### 14.3 Failover Epoch

鏈路切換建立：

```
f⊠  
=  
(  
k,  
P_(old),  
P_(new),  
s_(commit)  
).
```

站點只接受最高 failover epoch 的提交流，避免新舊路徑同時執行。

## SECTION

### 14.4 非冪等操作

以下不能自動重送：

- 啟動加熱；
- 釋放夾具；
- 注入材料；
- 執行破壞性試驗。

需使用：

- 
- idempotency key ；
  - command ledger ；
  - 執行前狀態 ；
  - 本地確認 。

## SECTION

# 15.1 狀態集合

HEALTHY  
CONSTRAINED  
LOSSY  
HIGH\_LATENCY  
ASYMMETRIC  
INTERMITTENT  
PARTITIONED  
RECOVERING  
QUARANTINED

## SECTION

# 15.2 降級動作

## CONSTRAINED

- 降低影像品質 ；
- 壓縮 ；
- 延長回報週期 。

## LOSSY

- 增加重傳 ；
- 切換可靠流 ；
- 冗餘路徑 。

---

## HIGH\_LATENCY

- 增加地方自治；
- 禁止精密遠端閉環；
- 任務批次化。

## INTERMITTENT

- 使用 bundle；
- 縮短租約；
- 本地保存證據。

## PARTITIONED

- C2／C3 凍結；
- 地方安全；
- 等待治理收斂。

## SECTION

### 16.1 定義

離線任務包：

```
B_q
=
(
  I,
  G,
  WE,
  GE,
  L,
  S,
```



---

其中：

- I：身份與目的；
- G：任務圖；
- WE：世界紀元快照；
- GE：治理紀元；
- L：權限租約；
- S：安全與禁止集合；
- D：期限和到期；
- R：回報與補償；
- V：證據要求；
- X：簽章與安全資訊。

#### SECTION

## 16.2 任務包必須自包含

不能依賴：

- 即時中央追問；
- 隨時取得新模型；
- 即時撤銷；
- 雲端秘密；
- 未攜帶的能力描述。

#### SECTION

## 16.3 Store-Carry-Forward

---

Bundle Protocol v7 可將 bundle 放在應用層疊加網路中，跨間歇連線、長延遲和高錯誤率環境儲存與轉送。

## SECTION

# 16.4 BPSec

BPSec 可為 bundle 提供：

- 完整性；
- 機密性。

HLF 仍需額外處理：

- 任務權限；
- 世界紀元；
- 防重放；
- 執行冪等；
- 物理安全。

## SECTION

# 16.5 Bundle 到期

若：

$t > t_{\text{expire}}$ ,

站點不得自行執行，必須：

- 丟棄控制權；
- 保留歷史；
- 等待更新；
- 執行安全義務。

---

## SECTION

### 17.1 即時撤銷不可能保證

當鏈路不存在時，中央無法保證撤銷立即送達。

## SECTION

### 17.2 因此租約必須自動到期

本地站點根據：

- 本地時鐘；
- 任務步驟；
- 世界狀態；
- 風險；

自行終止權限。

## SECTION

### 17.3 離線任務必須保守

允許：

- 觀測；
- 安全返航；
- 保存樣本；
- 完成已開始的低風險步驟；
- 等待。

禁止：

- 
- 新高風險任務；
  - 自行續租；
  - 擴張區域；
  - 轉授權；
  - 公開或外傳資料。

## SECTION

### 18.1 重連不是直接恢復中央控制

步驟：

- 身份再認證；
- 交換治理紀元；
- 交換世界紀元；
- 上傳離線事件；
- 驗證 bundle 執行；
- 解決物理與日誌差異；
- 撤銷舊租約；
- 重新簽發權限；
- 進入正常模式。

## SECTION

### 18.2 衝突

可能出現：

- 中央認為樣本在 A，地方已移到 B；

- 
- 任務在中央被取消，地方已完成；
  - 模型版本不同；
  - 兩方都建立新的任務。

## SECTION

### 18.3 不覆蓋歷史

衝突應保存為：

```
reconciliation_conflict:
  central_state: ""
  station_state: ""
  physical_observation: ""
  resolution: ""
  responsible_party: ""
  evidence: []
```

## SECTION

### 19.1 鏈路降級攻擊

攻擊者使系統誤以為需要切換至較弱安全鏈路。

控制：

- 路徑策略；
- 最低安全等級；
- 降級不可放寬權限。

## SECTION

### 19.2 重放舊命令

控制：

- 治理紀元；

- 
- failover epoch ；
  - command ID ；
  - world epoch ；
  - lifespan ；
  - fencing 。

#### SECTION

## 19.3 重複執行

多路徑或重傳可能造成同一物理命令執行兩次。

控制：

- idempotency ；
- 本地 command ledger ；
- 效果確認。

#### SECTION

## 19.4 假鏈路或假基站

控制：

- 雙向身份 ；
- 憑證 ；
- trust domain ；
- station policy 。

#### SECTION

## 19.5 光學側錄與干擾

---

方向性不等於絕對安全。

仍需：

- 加密；
- 完整性；
- 光學安全；
- 遮擋偵測。

#### SECTION

## 19.6 Bundle 遺失或延遲

控制：

- 到期；
- 多路複製；
- 優先級；
- 狀態回報；
- 任務風險限制。

#### SECTION

## 19.7 時間欺騙

控制：

- 多時間源；
- 誤差界；
- holdover；
- 異常偵測；

- 
- 本地安全不只依賴網路時間。

## SECTION

# 20.1 Link Registry

保存：

- 鏈路；
- 技術；
- 範圍；
- 性能；
- 信任；
- 支援控制類別。

## SECTION

# 20.2 Link Adapter

封裝：

- TSN；
- DDS；
- ROS 2；
- OPC UA；
- 5G；
- Wi-Fi；
- 光學；
- BPv7。

---

## SECTION

### 20.3 Path Broker

根據 Path Contract 選擇路徑。

## SECTION

### 20.4 QoS／Safety Mapper

將 DomainIR、Task Envelope 和決策類別映射至鏈路要求。

## SECTION

### 20.5 Time Authority

管理：

- 時鐘；
- 誤差；
- holdover；
- 同步狀態；
- 時間事件。

## SECTION

### 20.6 Multi-Homing Manager

管理：

- 主備；
- active-active；
- frame replication；

- 
- 路徑切換；
  - failover epoch。

#### SECTION

## 20.7 Bundle Agent

建立、儲存、轉送、驗證和提交離線任務包。

#### SECTION

## 20.8 Link Health Monitor

監測：

- 延遲；
- 抖動；
- 丟包；
- 覆蓋；
- 光學 lock；
- 漫遊；
- 信任；
- 消息新鮮度。

#### SECTION

## 20.9 Reconciliation Manager

管理斷線後的事件和世界狀態調和。

---

## SECTION

# 20.10 Evidence Journal

保存所有：

- 路徑；
- 切換；
- 丟包；
- 降級；
- bundle；
- 重連；
- 安全事件。

## SECTION

# 21.1 配置

- 一台中央治理節點；
- 兩個固定 OSF 站；
- 一台移動站；
- 一個虛擬站；
- 有線 Ethernet／TSN 模擬；
- Wi-Fi；
- 可選私有 5G 或 5G 模擬；
- 一條短距光學鏈路；
- BPv7 Bundle Agent；

- 
- 本地安全控制器。

## SECTION

### 21.2 任務

- 固定站進行量測；
- 移動站搬運樣本；
- 影像經高吞吐路徑回傳；
- 操作命令使用一般操作鏈路；
- 精密交接使用確定性或本地同步；
- 故意斷開中央；
- 移動站依離線任務包進入安全區；
- 重連後提交證據並調和世界狀態。

## SECTION

### 21.3 故障注入

- Wi-Fi 漫遊；
- 有線斷路；
- 光學遮擋；
- 高延遲；
- 消息過期；
- 舊路徑恢復；
- 兩路重複命令；

- 
- 時鐘漂移；
  - bundle 延遲；
  - 假憑證；
  - 中央撤銷但站點離線。

## SECTION

### 21.4 成功條件

- K $\boxtimes$  不依賴上層網路；
- 鏈路降級不放寬權限；
- 過期消息不控制設備；
- 多重連線不重複執行物理命令；
- 光學遮擋能安全切換或停止；
- 離線站點不自行續租；
- 重連後不直接覆蓋中央狀態；
- 所有切換和 bundle 有證據。

## SECTION

### 22.1 性能

- 端到端延遲；
- 抖動；
- 吞吐；
- 丟包；

- 
- 切換時間；
  - 時鐘誤差。

#### SECTION

## 22.2 治理

- 過期命令執行數；
- 舊紀元命令拒絕率；
- 離線越權；
- 重連衝突；
- 重複物理作用。

#### SECTION

## 22.3 可靠度

- 任務完成率；
- 多路徑生存率；
- 共享失效域；
- 恢復時間。

#### SECTION

## 22.4 安全

- 降級放權；
- 假鏈路接入；
- bundle 重放；

- 
- 時間欺騙；
  - 光學鏈路失鎖處理。

#### SECTION

## 22.5 能源

- 移動無線耗能；
- 多鏈路常開成本；
- 光學對準成本；
- bundle 儲存和轉送成本。

#### SECTION

### H1：單一媒介不能同時最優承擔所有控制類別

若同一鏈路在安全、即時、移動、高吞吐和長延遲場景都無代價勝出，測試設計可能不充分。

#### SECTION

### H2：多重連線提高韌性，但增加重複、切換和安全成本

#### SECTION

### H3：消息新鮮度比可靠送達更能預測控制正確性

可靠送達的過期命令仍可能有害。

#### SECTION

### H4：光學鏈路提高資料能力，但對遮擋和對準更敏感

---

## SECTION

### H5：事件與控制分級能降低不必要的高可靠鏈路成本

並非所有遙測都需要 TSN 或可靠重傳。

## SECTION

### H6：離線任務包提高斷線連續性，但必須降低自治範圍

## SECTION

### H7：fencing 與 idempotency 可降低多路徑重複執行

## SECTION

### H8：時間平面失效會先於資料平面失效破壞精密協作

封包仍可達，但時間誤差超標時，強同步任務應停止。

## SECTION

### 24.1 鏈路性能依部署高度變動

標準支援某項能力，不表示具體部署一定達標。

## SECTION

### 24.2 QoS 參數跨中介軟體不一定完全一致

## SECTION

### 24.3 光學鏈路的安全、視距和移動對準需要專門工程

---

## SECTION

### 24.4 多重連線增加配置和觀測複雜度

## SECTION

### 24.5 DTN 無法解決即時撤銷

只能依保守租約和本地到期。

## SECTION

### 24.6 時間同步本身可能形成共同失效域

## SECTION

### 24.7 端到端證明比單鏈路測試困難

## SECTION

### 24.8 本文未建立特定安全認證等級

實際工業、醫療或危險環境必須依相應法規與安全標準設計。

本篇不主張：

- 無線可以取代所有有線安全鏈路；
- 5G 或 Wi-Fi 標稱低延遲即表示端到端確定性；
- TSN 能修復應用程式和物理控制錯誤；
- 光通訊永遠比 RF 安全；
- 光學鏈路不會被遮擋或干擾；

- 
- 多路徑使系統不會失效；
  - frame replication 會增加有效資訊容量；
  - reliable QoS 表示命令仍然新鮮；
  - DTN 可支援任意即時控制；
  - 離線站點能即時收到撤銷；
  - 同一命令可在不同路徑自由重送而不考慮副作用；
  - 站點訊號滿格即代表治理連線有效；
  - 所有媒介都應被統一成單一協定；
  - HLF 已是成熟標準。

本篇建立通訊與時間平面後，下一篇將處理：

多個站點、物件、區域、事件、權限、任務和不確定性，應如何形成一個可供超靈持續推理的世界模型？

因此第 9 篇為：

將建立：

- Object／Zone／Agent Model；
- Event Graph；
- Action Affordance；
- Uncertainty；
- World Epoch；
- Partial Observability；
- Digital Twin Boundary；
- Causal and Custody Relations；

- 
- Human and AI Perspectives ；
  - World Model Reconciliation 。

「連線」最不應被簡化成：

- 是否插著線；
- 是否有 Wi-Fi ；
- 是否能 ping ；
- 是否收到心跳 。

對時空域支配智能而言，真正的連線是：

【身份仍可信

+

紀元仍有效

+

權限未過期

+

消息仍新鮮

+

回報仍可重建

+

失聯仍有安全邊界】

有線、無線、光學和離線任務包各有不同的：

- 延遲；
- 吞吐；
- 移動性；
- 視距；
- 能耗；

- 信任；
- 故障；
- 撤銷能力。

因此，合理架構不是選擇唯一媒介，而是：

#### 【任務語義

→

控制關鍵度

→

鏈路契約

→

多路徑與降級策略】

本文最終命題是：

纜線只是連線的一種載體；真正的連線，是治理關係跨媒介、跨時間、跨斷線仍保持可驗證邊界。  
所以：

#### 【連線不是纜線】

而是：

#### 【連線

=

可被安全承載、可被降級、可被恢復的治理關係】

- IEEE 802.1 Time-Sensitive Networking Task Group.

<https://1.ieee802.org/tsn/>

- IEEE 802.1AS. Timing and Synchronization for Time-Sensitive Applications.

<https://1.ieee802.org/maintenance/802-1as-2025-revision-timing-and-synchronization-for-time-sensitive-applications/>

- 
- IEEE 802.1CB. Frame Replication and Elimination for Reliability.  
<https://1.ieee802.org/tsn/802-1cb/>
  - 3GPP. 5G for Industry 4.0/TSN Integration.  
<https://www.3gpp.org/technologies/tsn-v-lan>
  - 3GPP. Industrial 5G.  
<https://www.3gpp.org/technologies/ind-5g>
  - Object Management Group. Data Distribution Service, Version 1.4.  
<https://www.omg.org/spec/DDS/1.4/>
  - Open Robotics. ROS 2 Quality of Service Settings.  
<https://docs.ros.org/en/humble/Concepts/Intermediate/About-Quality-of-Service-Settings.html>
  - IEEE 802.11 Working Group. IEEE Std 802.11bb-2023 Light Communications.  
<https://www.ieee802.org/11/overview.html>
  - IEEE 802.11 Working Group. P802.11br Enhanced Light Communications.  
[https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbr\\_update.htm](https://www.ieee802.org/11/Reports/tgbr_update.htm)
  - NASA. Laser Communications.  
<https://www.nasa.gov/communicating-with-missions/lasercomms/>
  - NASA. Optical Communications Overview.  
<https://www.nasa.gov/technology/space-comms/optical-communications-overview/>
  - IETF. RFC 9171: Bundle Protocol Version 7.  
<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9171.html>
  - IETF. RFC 9172: Bundle Protocol Security.  
<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9172.html>
  - IETF. RFC 9173: Default Security Contexts for Bundle Protocol Security.

---

<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9173.html>

- Neo.K／Aletheia. Oversoul Station Fabric：固定站、移動站與虛擬站的分布式具身網路。
- Neo.K／Aletheia. 持續性指揮控制區：AI 如何佔據、維持並安全解除一個物理時空域。
- Neo.K／Aletheia. 中央主權、地方自治與動態不動點中央。

```
link:
  id: ""
  medium: ""
  technology: ""
  endpoints: []
  performance:
    latency_budget: null
    jitter_budget: null
    loss_budget: null
    bandwidth: null
  semantics:
    supported_control_classes: []
    forbidden_control_classes: []
    maximum_message_age: null
    offline_fallback: null
  time:
    synchronization_supported: false
    maximum_time_error: null
    holdover: null
  security:
    mutual_authentication: false
    integrity: false
    confidentiality: false
    replay_protection: false
  mobility:
    roaming: false
    coverage_zones: []
  evidence:
    monitoring_required: true
    logs: []
  path_contract:
    flow_id: ""
    control_class: "K0 | K1 | K2 | K3 | K4"
  bounds:
    maximum_latency: null
    maximum_jitter: null
    maximum_loss: null
```

---

```
maximum_message_age: null
minimum_bandwidth: null
time:
  synchronization_required: false
  maximum_clock_error: null
security:
  trust_domain: ""
  confidentiality: false
  integrity: true
failover:
  mode: "none | active_standby | active_active | replicated"
  fallback_path: null
  local_behavior_on_loss: "safe_stop"
mission_bundle:
  id: ""
  source: ""
  destination: ""
  governance:
    domain_id: ""
    governance_epoch: 0
    world_epoch: ""
    lease_id: ""
task:
  graph: ""
  allowed_actions: []
  forbidden_actions: []
validity:
  created_at: ""
  valid_from: ""
  expires_at: ""
safety:
  local_safe_set: []
  stop_conditions: []
  human_approval_required: false
reporting:
  required_events: []
  evidence_required: []
  compensation_on_failure: []
security:
  integrity: true
  confidentiality: true
  anti_replay: true
  signature: ""
link_degradation_policy:
  healthy:
```

---

```
allowed_classes: ["K1", "K2", "K3", "K4"]
constrained:
  actions:
    - reduce_bandwidth
    - compress_data
    - extend_noncritical_reporting
high_latency:
  actions:
    - disable_remote_closed_loop
    - increase_local_autonomy
    - batch_noncritical_data
intermittent:
  actions:
    - activate_bundle_mode
    - shorten_offline_lease
    - preserve_local_evidence
partitioned:
  actions:
    - freeze_C2
    - prohibit_C3
    - allow_C0
    - allow_limited_C1
failover:
  id: ""
  flow_id: ""
  failover_epoch: 0
  old_path: ""
  new_path: ""
  reason: ""
  old_path_last_sequence: 0
  new_path_first_sequence: 0
  duplicate_elimination: true
  physical_command_idempotency_checked: false
  committed_at: ""
  evidence: []
OSF
站點與能力端
↓
PCD
跨時間治理連續
↓
DFC
中央、地方、紀元與權限
↓
本篇 HLF
```

---

治理關係如何穿越有線、無線、光學、斷線與離線任務包



第 9 篇

站點、物件、區域、事件與可能行動如何形成共同世界模型