

具身即佔域，對齊即能力

v0.1 / 2026-07-30 / Neo.K / 形式模型論文／分布式具身容量與排程理論

證據狀態：E0——形式模型、容量會計與實驗規格

<https://thisoneisneok.com/html/papers/stdi-06.html>

SECTION

分布式身體的時序容量、協調稅與規模邊界

Embodiment as Domain Occupation, Alignment as Capability: Temporal Capacity, Coordination Tax, and Scaling Boundaries of Distributed Bodies

系列：《時空域支配智能》系列第 6 篇

文件編號：EML-STD-I-EAC-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：形式模型論文／分布式具身容量與排程理論

證據成熟度：E0——形式模型、容量會計與實驗規格

公開狀態：私人研究稿；公開前應經 EML-CF 的 IP Gate、來源、安全與數學審查

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》

SECTION

摘要

分布式具身系統最容易產生的錯覺，是把站點數量、機器人數量、儀器數量或標稱吞吐量直接相加，並將其宣稱為系統能力。若一個實驗室新增十台機器人、二十個感測器和五個量測站，表面上似乎獲得數十倍具身能力；但這些節點可能共享同一條通道、同一個交接區、同一套工具、同一個電力峰值、同一名人工批准者、同一個樣本批次，或必須在狹窄時間窗中共同到位。其真實能力不由「有多少節點」決定，而由「多少節點、物料、工具、能源、權限、世界狀態和證據能在需要時被正確對齊」決定。

本文提出：

具身即佔域，對齊即能力。

「具身即佔域」表示，具身能力不只存在於機器人的本體，而表現為系統在有限物理時空域中可觀測、可到達、可操作和可維持的作用範圍。「對齊即能力」則表示，只有在任務所需的時間、位置、狀態、能力、權限、安全與證據條件共同成立時，裝設的具身資源才轉化為有效能力。

本文承接 ODML「對齊即容量」的核心修正：聚合運輸量、單一存取頭可交付量和可對齊容量不能混為同一數字；容量基準中已計入的自由度也不能再次相乘。本文將同一會計紀律遷移到分布式具身系統，區分四種容量：

$$\begin{aligned} C_{\text{(installed)}} \\ &\geq \\ C_{\text{(available)}} \\ &\geq \\ C_{\text{(aligned)}} \\ &\geq \\ C_{\text{(effective)}}. \end{aligned}$$

- $C_{(installed)}$ ：裝設容量，所有站點的標稱能力；
- $C_{(available)}$ ：扣除故障、維護、校準失效和不可達後的可用容量；
- $C_{(aligned)}$ ：在特定任務與時間窗下，能共同滿足能力、物料、空間、能源、權限和一致性條件的容量；
- $C_{(effective)}$ ：再扣除協調、交接、等待、爭用、恢復、安全和證據成本後，真正形成完成且可信結果的能力。

本文將這些成本定義為 協調稅 (Coordination Tax)：

$$\begin{aligned} \tau_{(coord)} &= \\ &\tau_{(communication)} \\ &+ \\ &\tau_{(synchronization)} \\ &+ \\ &\tau_{(handoff)} \\ &+ \\ &\tau_{(contention)} \\ &+ \\ &\tau_{(reconciliation)} \\ &+ \\ &\tau_{(safety)} \\ &+ \\ &\tau_{(evidence)} \\ &+ \\ &\tau_{(recovery)}. \end{aligned}$$

協調稅不是純粹浪費。部分協調成本換取安全、可恢復性、可重現性與正確性；真正應最小化的是沒有產生相應可靠度價值的無效協調。

本文進一步提出：

- 佔域覆蓋率：系統實際可觀測與可作用的時空區域；
- 能力聯集會計：重複能力不能直接相加；

- 共享瓶頸折扣：共用通道、工具、能源和人工批准者會限制總能力；
- 語義同步等級：只有語義上需要相遇的任務才進入強對齊窗口；
- Amdahl 型具身加速界限：不可平行的物理和治理比例封頂多站點加速；
- 失效域與爆炸半徑：中央化能降低協調成本，也可能放大共同失效；
- 弱耦合、強耦合與聯盟任務：不同任務具有不同對齊稅；
- 有效驗證容量：物理動作完成但證據不完整，不計入研究能力。

現有多機器人研究已證明，異質能力、時間窗、能源、聯盟任務與跨機器人依賴會使任務分配和排程成為複雜的組合問題；近期研究使用階層分解、MILP、時間邏輯、局部控制和線上同步，提高大規模團隊的可行性。Open-RMF 也已在實際建築中處理異質機器人、共享交通空間、電梯與門等基礎設施的衝突。這些工作支持本文的工程前提：多機器人價值來自協作，但協作本身會消耗通訊、同步和共享資源。

本文的核心結論是：

分布式具身系統的能力不是身體數量，而是被正確對齊、完成交付且能形成可信證據的物理作用量。

關鍵詞：具身即佔域、對齊即能力、分布式身體、具身容量、協調稅、可對齊容量、能力重複計數、時序窗口、異質多機器人、聯盟任務、失效域、Amdahl 定律、有效驗證容量、語義同步、規模邊界

前五篇建立了：

- STDI 的物理域治理；
- 超靈與多身體；
- OSF 站點網；
- PCD 跨時間持續存在；
- SPR/DomainIR 對物料、能源、行動與證據的編譯。

但尚未正面回答：

增加一個身體、站點或儀器後，系統真實能力究竟增加多少？

若不建立容量會計，系列會出現四種誇張：

- 把標稱吞吐當成有效能力；
- 把相同能力的重複配置重複計數；
- 忽略共享瓶頸；
- 只計算動作完成，不計算驗證、錯誤與恢復成本。

本文的任務是建立一套可以被模擬、量測和否證的具身容量模型。

ODML 已區分：

- 聚合飛行容量；
- 單一存取頭可交付頻寬；
- 可在共同時間窗中交互的可對齊容量。

其核心洞見是：

被分開傳輸不難，難的是讓需要互動的座標在正確時間相遇。

並建立容量會計原則：

若基準吞吐已經計入波長、偏振或其他自由度，不得將同一自由度再次乘入。

STDI 中同樣存在：

- 裝設多少機器；
- 單一站點能做多少；
- 多站點能否共同完成一項任務；
- 完成結果能否被驗證。

因此具身域需要同樣的分層會計。

SECTION

2.1 身體不只是硬體外殼

一個具身節點的價值，包括：

- 能看到哪裡；
- 能移動到哪裡；
- 能作用於哪些物件；
- 能施加何種力量與能源；
- 能維持多久；
- 能在何種安全與權限下行動。

SECTION

2.2 時空佔域集合

對站點 N ，定義其時空作用域：

```
cal-O
=
{
(z,t,a)
mid
z ∈ Z(t),
a ∈ A(t),
Permitted(N,z,a,t)
}.
```

其中：

- z ：空間位置或區域；
- t ：時間；
- a ：可執行作用。

整個系統的名義佔域為：

$$\begin{aligned} & \text{cal-O}_{\text{nominal}} \\ &= \\ & \text{bigcup}_{i=1}^n \text{cal-O}_i. \end{aligned}$$

SECTION

2.3 真實佔域

真實佔域還需扣除：

- 不可達；
- 站點故障；
- 連線限制；
- 人類排除；
- 能源不足；
- 工具缺失；
- 權限到期。

$$\begin{aligned} & \text{cal-O}_{\text{effective}}(t) \\ &= \\ & \text{bigcup} \\ & (\\ & \text{cal-O} \\ & \cap \\ & H \\ & \cap \\ & L \\ & \cap \\ & R \\ & \cap \\ & P \\ &). \end{aligned}$$

SECTION

2.4 佔域覆蓋率

對目標域 Ω^* ：

$$\eta_{\text{coverage}} = \frac{(\mu(\text{cal-O}_{\text{effective}} \cap \Omega^*))}{(\mu(\Omega^*))}.$$

其中 μ 可以是：

- 空間體積；
- 時間加權區域；
- 任務重要度加權作用域；
- 可觀測狀態測度。

高覆蓋率不必然表示高容量。系統可以看遍整個房間，卻缺乏任何精密操作能力。

SECTION

3.1 裝設容量

對站點 i 的標稱能力向量 c_{max} ：

$$C_{\text{installed}} = \text{bigoplus}_{i=1}^n c_{\text{max}}.$$

符號 bigoplus 不代表普通相加，而表示保留能力類別、參數範圍和適用條件的組合。

SECTION

3.2 可用容量

定義站點可用係數：

$$\begin{aligned} a_{\square}(t) \\ = \\ h_{\square}(t) \\ \cdot \\ k_{\square}(t) \\ \cdot \\ e_{\square}(t) \\ \cdot \\ p_{\square}(t), \end{aligned}$$

其中：

- $h_{\square}$ ：健康；
- $k_{\square}$ ：校準；
- $e_{\square}$ ：能源；
- $p_{\square}$ ：權限。

則：

$$\begin{aligned} C_{\text{(available)}}(t) \\ = \\ \text{bigoplus}_{\square} \\ a_{\square}(t)c_{\square}. \end{aligned}$$

SECTION

3.3 可對齊容量

對任務 q ，需要一個能力、資源與狀態聯盟：

```
cal-K_q  
=  
(  
  C_q,  
  M_q,  
  T_q,  
  E_q,  
  A_q,  
  W_q,  
  V_q  
)
```

其中：

- C_q ：能力；
- M_q ：物料與工具；
- T_q ：時間；
- E_q ：能源；
- A_q ：權限；
- W_q ：世界狀態；
- V_q ：證據。

可對齊聯盟集合：

```
\mathfrak{C}_q(t)  
=  
{  
  S \subseteq \text{cal-N}  
  \mid  
  S \models \text{cal-K}_q(t)  
}.  

```

可對齊容量為：

$$\begin{aligned} C_{\text{aligned}}(q,t) \\ = \\ \max_{S \in \mathcal{S}} \left(\frac{C_q(t)}{V_q(S)} \right) \end{aligned}$$

其中 $V_q(S)$ 是該聯盟能交付的任務價值或吞吐。

SECTION

3.4 有效容量

定義：

$$\begin{aligned} C_{\text{effective}} \\ = \\ C_{\text{aligned}} \\ - \\ C_{\text{coord}} \\ - \\ C_{\text{failure}} \\ - \\ C_{\text{verification}}^{\text{(missing)}}. \end{aligned}$$

或用比例表示：

$$\begin{aligned} C_{\text{effective}} \\ = \\ C_{\text{aligned}} \\ (\\ 1 - \\ \tau_{\text{coord}} \\) \\ p_{\text{success}} \\ p_{\text{evidence}}. \end{aligned}$$

其中：

- $p_{\text{(success)}}$ ：物理任務成功概率；
- $p_{\text{(evidence)}}$ ：結果滿足證據契約的概率。

SECTION

4.1 能力聯集，不是設備計數

兩台相同相機提供：

- 備援；
- 不同視角；
- 並行觀測。

但如果它們：

- 只能看同一位置；
- 共用同一網路瓶頸；
- 需要同一人工操作員；

其能力增量不等於兩倍。

SECTION

4.2 重複能力折扣

對能力 c ：

$$\begin{aligned} C_c^{\text{(union)}} &= \\ &\sum_{i,j} c_{ij} \\ &- \\ &\sum_{i < j} p_{ij}^{(c)} \\ &+ \\ &\sum_{i < j < k} p_{ijk}^{(c)} \end{aligned}$$

其中 ρ 表示能力重疊。

工程上不需要完整容斥計算，可以將站點分成：

- 完全可疊加；
- 部分重疊；
- 純備援；
- 互斥；
- 必須成組。

SECTION

4.3 備援不算主動吞吐

一主一備配置的價值主要是可用性：

$$\begin{aligned} C_{\text{(throughput)}} \\ \approx \\ C_{\text{(primary)},} \end{aligned}$$

而可靠度可能提升：

$$\begin{aligned} R_{\text{(system)}} \\ > \\ R_{\text{(primary)}}. \end{aligned}$$

不能把備援設備同時計入吞吐和可靠度增益。

SECTION

4.4 共享瓶頸

若 n 個站點共享容量 B 的資源：

$$\sum_{i=1}^n x_i$$

$\leq$

B.

共享瓶頸可能是：

- 狹窄走道；
- 電梯；
- 交接區；
- 工具；
- 儀器；
- 網路；
- 電力；
- 冷卻；
- 人工批准；
- 樣本批次。

Open-RMF 對共享空間、電梯、門和交通衝突的治理，正是此類瓶頸的現實範例。

SECTION

5.1 獨立任務

每個站點可單獨執行：

$$q_i \perp q_j.$$

例如不同房間的獨立環境觀測。

此時並行收益最接近線性。

SECTION

5.2 弱耦合任務

需要共享：

- 最終世界狀態；
- 同一批材料；
- 大致時間期限；
- 結果合併。

但不需要精確同時。

此時可採有界過期和最終一致。

SECTION

5.3 強耦合任務

需要：

- 同時抓取；
- 共同搬運；
- 精密交接；
- 同步量測；
- 共同安全區；
- 相同世界紀元。

其對齊成本最高。

SECTION

5.4 聯盟任務

一項任務需多種能力：

$$\sum_{i \in S} c_i \models C_q.$$

近期異質 MRTA 研究已明確處理：

- 不可分割任務；
- 可分割或中繼任務；
- 需要機器人聯盟共同完成的任務；
- 充電與長續航。

這說明「多身體共同完成」本身就是獨立的排程類型。

對任務 q ，定義：

$$a_q = (a_{\text{cap}}, a_{\text{space}}, a_{\text{time}}, a_{\text{material}}, a_{\text{energy}}, a_{\text{authority}}, a_{\text{world}}, a_{\text{evidence}}).$$

SECTION

6.1 能力對齊

所需能力必須由一個或多個有效證書滿足。

SECTION

6.2 空間對齊

站點、樣本、工具和安全區域必須在可行路徑上相遇。

SECTION

6.3 時間對齊

所有必要窗口必須有非空交集：

$$\begin{aligned} & \text{bigcap}_{(r \in R_q)} \\ & [t_{r\Box}, t_{r\Box}] \\ & \neq \\ & \emptyset. \end{aligned}$$

SECTION

6.4 物料對齊

樣本、容器、工具與校準件必須處於正確保管和狀態。

SECTION

6.5 能源對齊

功率、能源品質、冷卻與熱預算同時成立。

SECTION

6.6 權限對齊

所有身體和區域租約有效，人工批准已完成。

SECTION

6.7 世界狀態對齊

依賴的世界紀元沒有失效。

SECTION

6.8 證據對齊

所需感測、校準和原始資料管線已準備。

SECTION

6.9 最弱環節

可以使用保守模型：

$$\begin{aligned} A_q &= \\ \min_k a_{(q,k)}. \end{aligned}$$

任一必要對齊維度為零，整項任務不可執行。

SECTION

7.1 定義

理想情況下， n 個單位能力站點提供：

$$C_{(ideal)}(n) = nC_{\square}.$$

實際：

$$\begin{aligned} C_{(actual)}(n) &= \\ C_{(ideal)}(n) &- \end{aligned}$$

協調稅：

$$\begin{aligned}\tau_{\text{coord}}(n) \\ &= \\ (C_{\text{coord}}(n)) / (C_{\text{ideal}}(n)).\end{aligned}$$

SECTION

7.2 組成

$$\begin{aligned}\tau_{\text{coord}} \\ &= \\ \tau_{\text{communication}} \\ &+ \\ \tau_{\text{synchronization}} \\ &+ \\ \tau_{\text{handoff}} \\ &; \\ &+ \\ \tau_{\text{contention}} \\ &+ \\ \tau_{\text{reconciliation}} \\ &+ \\ \tau_{\text{safety}} \\ &; \\ &+ \\ \tau_{\text{evidence}} \\ &+ \\ \tau_{\text{recovery}}.\end{aligned}$$

SECTION

7.3 通訊稅

-
- 狀態回報；
 - 任務協商；
 - 世界模型更新；
 - 心跳；
 - 衝突解決。

在連線受限的多機器人系統中，全時通訊通常不現實。2026 年的事件觸發協調研究以任務和空間事件決定何時通信，報告通訊開銷可下降，同時保持協調性能。這支持「並非所有狀態都值得持續同步」。

SECTION

7.4 同步稅

- 等待較慢站點；
- 共同起點；
- 時鐘和世界紀元；
- 共同行動窗口。

SECTION

7.5 交接稅

- 移動；
- 保留；
- 驗證；
- 責任轉移；
- 補償。

SECTION

7.6 爭用稅

共享：

- 路徑；
- 工具；
- 儀器；
- 電力；
- 人工批准。

SECTION

7.7 狀態調和稅

中央與地方、分叉體、斷線站點之間需要比較並解決：

- 位置；
- 樣本；
- 任務；
- 權限；
- 記憶。

SECTION

7.8 安全稅

- 速度降低；
- 雙重確認；

-
- 人員排除；
 - 本地互鎖；
 - 安全停機。

安全稅不是應消除的浪費，而是換取事故風險下降的成本。

SECTION

7.9 證據稅

- 校準；
- 原始資料；
- 影像；
- 日誌；
- 簽章；
- 重複量測。

沒有證據稅，系統或許做得更快，但不能可靠驗證概念產品。

SECTION

7.10 恢復稅

- 備援；
- 快照；
- 重播；
- 盤點；
- 重排。

SECTION

8.1 淨協調價值

定義：

$$\begin{aligned} V_{\text{(coord)}} &= \\ &\Delta R_{\text{(reliability)}} \\ &+ \\ &\Delta S_{\text{(safety)}} \\ &+ \\ &\Delta V_{\text{(evidence)}} \\ &- \\ &C_{\text{(coord)}}. \end{aligned}$$

若：

$$V_{\text{(coord)}} > 0,$$

協調值得。

SECTION

8.2 過度同步

不是所有資料與站點都需要強同步。

SFRSN 已提出：

只有語義上需要相遇的資料才應消耗對齊預算。

STDI 同樣應：

- 安全與交接：強同步；
- 排程與健康：有界過期；

- 長期學習：最終一致；
- 獨立實驗：弱同步。

SECTION

8.3 語義同步策略

```
SyncClass(q)
∈
{
hard,
bounded,
event-triggered,
eventual,
none
}.
```

對齊是昂貴資源，應由任務語義決定。

SECTION

9.1 不可平行比例

設任務中不可平行部分為 s ，可平行部分為 $1-s$ 。

理想加速：

```
S_(ideal)(n)
=
(1)/(s+(1-s)/(n)).
```

SECTION

9.2 加入協調與爭用

$$\begin{aligned} & S_{\text{(embodied)}}(n) \\ & = \\ & (1)/(s+(1-s)/(n) \\ & +\kappa(n) \\ & +\rho(n) \\ & +\phi(n)). \end{aligned}$$

其中：

- $\kappa(n)$ ：協調；
- $\rho(n)$ ：共享資源爭用；
- $\phi(n)$ ：失敗與恢復。

SECTION

9.3 物理串行區

不可平行部分可能包括：

- 樣本固化；
- 單一稀有儀器；
- 人工批准；
- 單一交接區；
- 安全檢查；
- 依序加工；
- 結果驅動下一步。

SECTION

9.4 最佳站點數

當：

$$\begin{aligned} & (dS_{\text{embodied}})/(dn) \\ & \leq 0, \end{aligned}$$

增加站點不再提高能力。

最佳規模：

$$\begin{aligned} n^* \\ = \\ \operatorname{argmax}_{n} \\ S_{\text{embodied}}(n). \end{aligned}$$

因此，系統可能存在「增加機器反而更慢」的區域。

SECTION

10.1 任務需求

任務 q ：

$$\begin{aligned} q \\ = \\ (\\ & r_q, \\ & [d_{q\text{min}}, d_{q\text{max}}], \\ & \ell_q, \\ & v_q, \\ & p_q \\ &), \end{aligned}$$

其中：

- r_q ：資源與能力需求；
- $[d_{q\text{min}}, d_{q\text{max}}]$ ：時間窗；

- ℓ_q ：持續時間；
- v_q ：價值；
- p_q ：成功概率。

SECTION

10.2 有效吞吐

在區間 $[0, T]$ ：

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{effective}}(T) \\ = \\ (\sum_{(q \in Q_{\text{verified}}(T))} v_q) / (T). \end{aligned}$$

只計入：

- 完成；
- 驗證；
- 未被撤銷；
- 證據完整；

的任務。

SECTION

10.3 排程可行率

$$\begin{aligned} \eta_{\text{sched}} \\ = \\ (|Q_{\text{aligned}}|) / (|Q_{\text{requested}}|). \end{aligned}$$

SECTION

10.4 鬆弛量

任務鬆弛：

$$\begin{aligned} \sigma_q &= \\ & d_q \boxtimes \\ & - \\ & d_q \boxtimes \\ & - \\ & \ell_q \\ & - \\ & T_{\text{(transfer)}} \\ & - \\ & T_{\text{(verify)}}. \end{aligned}$$

σ_q 越小，對齊越困難。

SECTION

11.1 異質能力擴大聯集

不同站點可以提供：

- 移動；
- 精密抓取；
- 成像；
- 熱；
- 化學；
- 算力。

SECTION

11.2 異質性提高轉譯成本

需要：

- 不同 adapter ；
- 不同控制頻率 ；
- 不同錯誤模式 ；
- 不同能力證書 ；
- 不同維護 。

SECTION

11.3 異質價值條件

新增站點 $N_{\square}$ 的邊際價值：

$$\begin{aligned} \Delta V_{\square} &= \\ &\Delta C_{\text{(unique)}} \\ &+ \\ &\Delta R_{\text{(resilience)}} \\ &+ \\ &\Delta O_{\text{(coverage)}} \\ &- \\ &\Delta C_{\text{(coord)}} \\ &- \\ &\Delta C_{\text{(integration)}}. \end{aligned}$$

若 $\Delta V_{\square} \leq 0$ ，不應為「多一種身體」而加入。

SECTION

11.4 車隊設計本身是最佳化問題

研究已將異質車隊選型、任務配置、時間窗和預算共同建模，並指出精確 MILP 在規模增長時可擴展性有限，需要啟發式或 Large Neighbourhood Search。這支持 OSF 在採購與架構階段就應評估站點組合，而不是先買設備再尋找用途。

SECTION

12.1 獨立故障與共同故障

若站點故障獨立，增加站點可提升韌性。

若共享：

- 電力；
- 網路；
- 世界模型；
- 中央策略；
- 單一工具；

則可能形成共同失效。

SECTION

12.2 失效域

定義：

```
F ⊆  
=  
{  
N ⊆  
mid  
fail(r ⊆)
```


SECTION

12.3 爆炸半徑

$$\begin{aligned} B(r_{\text{max}}) \\ = \\ \sum_{N_{\text{max}} \in F_{\text{max}}} \\ w_{\text{max}}. \end{aligned}$$

中央化可以降低協調稅，但提高某些故障的爆炸半徑。

SECTION

12.4 容量與韌性不能用同一數字

應分別報告：

- 正常吞吐；
- 降級吞吐；
- 單故障後能力；
- 平均恢復時間；
- 最大失效域。

SECTION

13.1 中央化

優點：

- 全局資訊；
- 較少協商；
- 較容易證據與治理。

缺點：

- 延遲；
- 單點失效；
- 擴展壓力。

SECTION

13.2 地方自治

優點：

- 快速反應；
- 斷線能力；
- 降低中央負載。

缺點：

- 狀態分歧；
- 重複工作；
- 局部最優；
- 權限漂移。

SECTION

13.3 混合式

近期多機器人時間邏輯研究使用：

- 高階集中配置；
- 低階地方控制；
- 線上通信同步；

處理重複任務與延遲，並在九台實體機器人與更大模擬規模上驗證適應性。這支持 STDI 的「中央策略＋地方執行＋事件觸發同步」。

SECTION

13.4 動態不動點中央

遠期可根據：

- 資訊完整；
- 延遲；
- 信任；
- 故障；
- 任務耦合；

動態選擇治理中心。

但中心漂移本身也產生協調稅，不能假設免費。

SECTION

規則一：不把裝設數量當有效能力

報告必須列四層容量。

SECTION

規則二：已計入的能力不得重乘

若單站吞吐已包含多工具或多相機並行，不得再次以工具數乘算。

SECTION

規則三：共享瓶頸取最小截面

串聯系統能力：

$$C_{\text{(pipeline)}} \leq \min_i C_i.$$

SECTION

規則四：備援與吞吐分開

備援主要增加可靠度，不自動增加正常吞吐。

SECTION

規則五：不可替代的異質能力不做標量相加

一台顯微鏡與一台移動機器人的能力不能直接寫成「2 個能力單位」。

SECTION

規則六：物理完成但證據失敗，不計入驗證容量

SECTION

規則七：等待不是設備能力

大量排隊中的設備不表示大量可用能力。

SECTION

規則八：安全限制是容量邊界

不能把取消安全後的理論吞吐當合法容量。

SECTION

規則九：按任務族報告

同一站網對：

- 獨立任務；
 - 弱耦合任務；
 - 強耦合任務；
- 的容量完全不同。

SECTION

規則十：報告協調稅與邊際收益

每新增一個站點都應量測：

$\Delta C_{\text{(effective)}}$
與
 $\Delta \tau_{\text{(coord)}}$.

SECTION

15.1 研究能力不等於動作吞吐

定義物理完成量：

$C_{\text{(action)}}$.

定義證據完整量：

$C_{\text{(verified)}}$.

通常：

$$C_{\text{(verified)}}$$
$$\leq$$
$$C_{\text{(action)}}.$$

SECTION

15.2 驗證折扣

$$\eta_{\text{(verify)}}$$
$$=$$
$$(C_{\text{(verified)}})/(C_{\text{(action)}}).$$

SECTION

15.3 有效研究容量

$$C_{\text{(research)}}$$
$$=$$
$$C_{\text{(action)}}$$
$$\cdot$$
$$\eta_{\text{(verify)}}$$
$$\cdot$$
$$\eta_{\text{(reproducible)}}$$
$$\cdot$$
$$\eta_{\text{(relevant)}}.$$

其中：

- $\eta_{\text{(reproducible)}}$ ：可重現；
- $\eta_{\text{(relevant)}}$ ：結果對假說有實際資訊價值。

做了一萬次沒有校準或不能區分假說的動作，不代表高研究能力。

SECTION

16.1 目的

量測站點數量從 1,2,4,8 增加時：

- 裝設容量；
- 可用容量；
- 可對齊容量；
- 有效容量；
- 協調稅；

如何變化。

SECTION

16.2 任務族

T1：獨立觀測

多個樣本各自成像。

T2：弱耦合搬運與量測

移動站將樣本送至不同量測站。

T3：強耦合交接

兩個身體在同一交接區完成樣本轉移。

T4：聯盟搬運

兩個或多個身體共同移動大物體。

T5：證據密集任務

每個步驟要求校準、原始數據、影像和保管證據。

SECTION

16.3 控制變量

- 相同任務總量；
- 相同站點能力；
- 相同區域；
- 相同能源；
- 相同安全；
- 相同證據要求。

SECTION

16.4 指標

- 任務完成時間；
- 等待；
- 通訊量；
- 同步次數；
- 交接失敗；
- 路徑衝突；
- 能源峰值；
- 人工介入；

-
- 證據完整；
 - 恢復時間。

SECTION

17.1 軟體

- OSF 模擬站網；
- DomainIR；
- SPR Scheduler；
- Open-RMF 或等價交通層；
- ROS 2 模擬；
- Event／Evidence Journal；
- 故障注入器。

SECTION

17.2 物理

- 兩台移動平台；
- 一個固定機械臂；
- 一個量測站；
- 一個交接區；
- 一個共享充電或通道瓶頸。

SECTION

17.3 實驗矩陣

站點數：1 / 2 / 4 / 8

耦合：獨立 / 弱 / 強 / 聯盟

同步：全時 / 有界 / 事件觸發 / 最終

故障：無 / 單站 / 網路 / 共享資源

證據：低 / 標準 / 高

SECTION

17.4 輸出

- Capacity Report ；
- Coordination Tax Breakdown ；
- Alignment Failure Matrix ；
- Scaling Curve ；
- Failure Domain Map ；
- Evidence Discount 。

SECTION

H1：站點數與有效容量不是線性關係

在弱耦合及強耦合任務中， $C_{\text{effective}}(n)$ 應呈現遞減邊際收益。

SECTION

H2：獨立任務接近線性，強耦合任務較早飽和

若兩者曲線完全相同，對齊分類沒有解釋力。

SECTION

H3：事件觸發同步可降低通訊稅

在不影響關鍵安全與交接的前提下，事件觸發應比全時同步減少通訊。

SECTION

H4：證據要求降低表面吞吐，但提高有效驗證率

若高證據模式不降低動作吞吐，可能代表證據成本未被真實計入。

SECTION

H5：共享瓶頸會使新增站點失去邊際價值

當路徑、儀器或能源飽和後，新增站點可能只增加排隊與協調。

SECTION

H6：局部自治在斷線時提高能力，在一致性任務中可能增加調和稅

地方自治不是單向增益。

SECTION

H7：能力重複計數會系統性高估容量

以站點數或標稱吞吐計算的預測，應高於實測有效容量。

SECTION

H8：存在任務相關的最佳站點數 n^*

對至少部分強耦合任務，增加節點超過 n^* 後應不再增益，甚至退化。

SECTION

19.1 能力難以壓縮成單一數字

本文建議使用能力向量和任務族，而不是唯一「具身算力」。

SECTION

19.2 協調稅分解可能重疊

等待可能同時來自同步、爭用和安全，需要統一會計規則。

SECTION

19.3 任務價值具有主觀性

不同研究計畫對結果價值不同。

SECTION

19.4 模擬和現實差距

真實設備故障、摩擦、人類介入和網路抖動會改變曲線。

SECTION

19.5 大型系統的精確最佳化不可擴展

需採階層、啟發式和滾動規劃。

SECTION

19.6 對齊要求可能動態變化

同一任務在不同階段有不同同步級別。

SECTION

19.7 安全和倫理不能被折算成純吞吐

不能因提高容量而取消不可違反的限制。

本篇不主張：

- 站點越多能力越大；
- 所有具身能力可以換算成同一單位；
- 協調稅可以完全消除；
- 所有同步都應分散化或事件觸發；
- Amdahl 型公式能精確描述所有物理系統；
- 故障彼此獨立；
- 備援設備可以同時計入吞吐增益；
- 物理動作完成等於研究驗證完成；
- 對齊是唯一瓶頸；
- 中央治理必然優於地方自治；
- 動態不動點中央沒有切換成本；
- 模擬得到的規模曲線可直接代表實驗室；
- 機器人數量可以作為自主研究能力的代理指標。

本文建立容量與對齊理論後，下一篇將專門處理：

當中央超靈、地方 Agent 和多個治理節點都有決策能力時，誰擁有什麼主權？如何在失聯、衝突和多中心狀態下收斂？

因此第 7 篇為：

將深入建立：

- Authority Lattice；
- Local Veto；
- Delegation Boundary；

-
- Consensus／Commit ；
 - Split-Brain ；
 - Dynamic Center Election ；
 - Governance Epoch ；
 - Responsibility Partition ；
 - 多 AI 衝突和收斂。

分布式具身系統最大的幻覺，是把「身體很多」誤認為「能力很大」。

真實容量至少經過四層折扣：

C_(installed)
≥
C_(available)
≥
C_(aligned)
≥
C_(effective).

站點只有在：

- 正常；
- 校準；
- 有工具；
- 有物料；
- 有能源；
- 有權限；
- 有正確世界狀態；
- 能在任務窗口相遇；

- 能完成證據；

時，才真正形成能力。

因此：

【具身

≠

擁有一具硬體外殼】

而是：

【具身

=

在時空域中取得可觀測、可到達與可作用的位置】

同時：

【能力

≠

站點數量】

而是：

【能力

=

被對齊、被交付、被驗證的作用量】

本文最終將「具身即佔域，對齊即能力」濃縮為：

身體讓智能獲得物理位置；對齊讓位置轉化為共同作用；證據讓共同作用轉化為可信研究能力。

- Neo.K／Aletheia. 對齊即容量：飛行即定址架構的差分時序界限與分層排程. EML-ODML-2026-v0.5.
- Neo.K／Aletheia. 語義即路由：AI 資料中心的語義流站網與直連流時空間. EML-SFRSN-2026-v0.1.
- Neo.K／Aletheia. 語義即路由：從 O-Chip 維度代理人到 AI 資料中心語義流治理. EML-SFRSN-2026-v0.2.

-
- Notomista, G., Mayya, S., Hutchinson, S. and Egerstedt, M. An Optimal Task Allocation Strategy for Heterogeneous Multi-Robot Systems. arXiv:1903.08641, 2019.
 - Luo, X. and Zavlanos, M. M. Temporal Logic Task Allocation in Heterogeneous Multi-Robot Systems. arXiv:2101.05694, 2021.
 - Giacometti, Z. and Zhang, Y. Allocation of Multi-Robot Tasks with Task Variants. arXiv:2007.00777, 2020.
 - Wilde, N. and Alonso-Mora, J. Designing Heterogeneous Robot Fleets for Task Allocation and Sequencing. arXiv:2312.07234, 2023.
 - Nam, C. et al. Heterogeneous Multi-Robot Task Allocation for Long-Endurance Missions in Dynamic Scenarios. arXiv:2411.02062, revised 2025.
 - Liu, W., Majcherczyk, N. and Pecora, F. Scalable Multi-Robot Task Allocation and Coordination under Signal Temporal Logic Specifications. arXiv:2503.02719, 2025.
 - Lin, X. and Tron, R. Adaptive Bi-Level Multi-Robot Task Allocation and Learning under Uncertainty with Temporal Logic Constraints. arXiv:2502.10062, 2025.
 - Peron, D. et al. Efficient Coordination and Synchronization of Multi-Robot Systems Under Recurring Linear Temporal Logic. arXiv:2502.16531, 2025.
 - Aznar, F. et al. Event-Triggered Adaptive Consensus for Multi-Robot Task Allocation with Communication Awareness. arXiv:2604.06813, 2026.
 - Open Robotics. Open-RMF demonstrations and multi-fleet traffic coordination.
https://github.com/open-rmf/rmf_demos
 - ROS 2. Interfaces: Topics, Services and Actions.
https://docs.ros.org/en/ros2_documentation/rolling/Concepts/Basic/Interfaces-Topics-Services-Actions.html
 - ROS 2. message_filters and time synchronization.
https://docs.ros.org/en/ros2_packages/kilted/api/message_filters/message_filters.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. 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.

```
capacity_report:
  domain_id: ""
  task_family: ""
  time_window: ""
  installed:
    stations: 0
    capability_vector: {}
  available:
    stations: 0
    unavailable_reasons: {}
  aligned:
    feasible_coalitions: 0
    limiting_alignment_dimensions: []
  effective:
    verified_tasks: 0
    value_per_hour: 0
  coordination_tax:
    communication: 0
    synchronization: 0
    handoff: 0
    contention: 0
    reconciliation: 0
    safety: 0
    evidence: 0
    recovery: 0
  shared_bottlenecks: []
  failure_domains: []
  evidence_discount: 0
  alignment_requirement:
    task_id: ""
    capability:
      required: []
      coalition_allowed: true
  space:
    zones: []
    co_location_required: false
  time:
    window: null
    synchronization_class: "bounded"
    maximum_skew: null
  material:
```

```
objects: []
custody_required: true
energy:
  power_profile: null
  cooling_required: null
authority:
  leases: []
  human_approval: false
world:
  epoch: ""
  freshness_requirements: {}
evidence:
  required: []
coordination_event:
  id: ""
  task_id: ""
  category: "communication | synchronization | handoff | contention |
    reconciliation | safety | evidence | recovery"
  started_at: ""
  ended_at: ""
  affected_stations: []
  affected_resources: []
  value_protected: ""
  avoidable: null
  evidence: []
scaling_experiment:
  task_family: ""
  station_counts: [1, 2, 4, 8]
coupling:
  - independent
  - weak
  - strong
  - coalition
synchronization:
  - continuous
  - bounded
  - event_triggered
  - eventual
failure_modes:
  - none
  - single_station
  - network_partition
  - shared_resource
metrics:
  - installed_capacity
```

-
- available_capacity
 - aligned_capacity
 - effective_capacity
 - coordination_tax
 - verified_throughput
 - recovery_time

ODML

聚合容量 ≠ 可對齊容量



SFRSN

只有語義需要相遇的流才消耗對齊預算



OSF

異質固定、移動、儀器與虛擬站點



PCD

跨時間維持狀態、義務和權限



SPR

意圖編譯成物料、能源、行動與證據流



本篇

計算站點數量如何轉化為可對齊、有效且可信的能力



第 7 篇

決策權如何在中央、地方與動態中心之間配置