

IADL v1.0 規格文件

Industrial Asset Definition Language (IADL) v1.0 Specification

版本: 1.0

日期: 2025-10-22

作者: Michael Lin 林志錚

組織: HTFA/Digital Twins Alliance

1. 概述

Industrial Asset Definition Language (IADL) 是一種用於定義工業資產的標準化語言。IADL v1.0 提供了完整的資產定義規範，包括幾何模型、座標系統、標籤（Tags）附著策略和元數據管理。

1.1 設計目標

IADL v1.0 的設計目標包括：

- 唯一識別:** 使用 UUIDv7 確保資產的全域唯一性和時間排序性。
- 模型引用:** 支援 USD 模型的靈活引用機制（路徑或 Reference）。
- 單位制統一:** 明確定義長度單位，確保跨系統一致性。
- 靈活的 Tag 附著:** 支援基於位置（by-pos）和基於原語（by-prim）兩種 Tag 附著策略。
- 版本化友好:** 基於原語的 Tag 附著對模型版本變更具有更好的耐受性。
- 元數據管理:** 記錄作者、版本等元數據，支援資產生命週期管理。

2. IADL v1.0 Schema

2.1 頂層結構

```
asset_id: string (UUIDv7)      # 資產唯一識別碼
name: string                   # 資產名稱
description: string             # 資產描述 (可選)
model_ref: string               # USD 模型引用 (路徑或 Reference)
units:                          # 單位制定義
  length: string               # 長度單位 (m, cm, mm)
default_xform:                 # 預設變換矩陣
  translation: [float, float, float] # 平移 (x, y, z)
  rotation: [float, float, float]   # 旋轉 (歐拉角, 度)
  scale: [float, float, float]      # 縮放 (x, y, z)
tags: []                       # 標籤列表
metadata:                      # 元數據
  author: string                 # 作者
  version: string                # 版本號 (語義化版本)
  created_at: string             # 創建時間 (ISO 8601)
  updated_at: string             # 更新時間 (ISO 8601)
```

2.2 Tag 結構

```
tag_id: string (UUIDv7)      # Tag 唯一識別碼
name: string                  # Tag 名稱
kind: string                  # Tag 類型 (sensor, actuator, indicator, etc.)
eu_unit: string               # 工程單位 (m³/h, °C, bar, etc.)
worldSpace: boolean           # 是否使用世界座標系 (預設 false)
# Tag 附著策略 (二選一)
localPosition: [float, float, float] # 基於位置 (by-pos) : 相對於資產原點的局部座標
attachPrimPath: string        # 基於原語 (by-prim) : USD Prim 路徑
```

3. 詳細欄位說明

3.1 asset_id (UUIDv7)

類型: string

格式: UUIDv7

必填: 是

說明:

資產的全域唯一識別碼，使用 **UUIDv7** 格式。UUIDv7 相較於 UUIDv4 的優勢：

- **時間排序性**: UUIDv7 包含時間戳，可按生成時間排序，便於資產管理和查詢。

- **全域唯一性:** 確保在分散式系統中不會產生衝突。

範例:

```
asset_id: "018c3f7e-8a2b-7c3d-9e4f-5a6b7c8d9e0f"
```

3.2 model_ref (USD 模型引用)

類型: `string`

必填: 是

說明:

指向 USD 模型的引用，支援兩種格式：

1. **絕對路徑：** 指向本地或網路上的 USD 文件。
`yaml model_ref: "/assets/pump/pump_model.usd"`
2. **USD Reference:** 使用 USD 的 Reference 語法。
`yaml model_ref: "@/assets/pump/pump_model.usd@</Pump>"`

最佳實踐:

- 使用相對路徑或 Asset Resolver，提高可移植性。
- 確保 USD 文件遵循 Z-up、米制、右手座標系規範。

3.3 units (單位制定義)

類型: `object`

必填: 是

說明:

定義資產使用的單位制，確保跨系統一致性。

欄位:

- **length** (`string`, 必填): 長度單位，支援 `m` (米)、`cm` (厘米)、`mm` (毫米)。

範例:

```
units:  
  length: "m"
```

約束:

- 必須與 USD 模型的 `metersPerUnit` 元數據一致。
- 建議統一使用 米 (m) 作為標準單位。

3.4 default_xform (預設變換矩陣)

類型: `object`

必填: 否

說明:

定義資產的預設變換矩陣，包括平移、旋轉和縮放。此變換在 FDL 中實例化資產時可被覆蓋。

欄位:

- **translation** (`[float, float, float]`): 平移向量 (x, y, z)，單位為 `units.length`。
- **rotation** (`[float, float, float]`): 旋轉向量 (歐拉角，度)，順序為 XYZ。
- **scale** (`[float, float, float]`): 縮放向量 (x, y, z)。

範例:

```
default_xform:  
  translation: [0.0, 0.0, 0.0]  
  rotation: [0.0, 0.0, 0.0]  
  scale: [1.0, 1.0, 1.0]
```

約束:

- **縮放限制:** 製造業資產通常要求等比縮放，建議限制 `scale` 為 `[s, s, s]`，其中 `0.5 <= s <= 2.0`。
- **禁止非均勻縮放:** 非均勻縮放可能導致碰撞檢測和物理模擬錯誤。

3.5 tags (標籤列表)

類型: array

必填: 否

說明:

定義資產上的標籤 (Tags)，用於關聯感測器、執行器、指示器等數位孿生元素。

Tag 欄位:

- **tag_id** (string, UUIDv7, 必填): Tag 的全域唯一識別碼。
- **name** (string, 必填): Tag 的名稱。
- **kind** (string, 必填): Tag 的類型，支援 sensor、actuator、indicator、control_point 等。
- **eu_unit** (string, 可選): 工程單位，例如 m³/h、°C、bar、kW 等。
- **worldSpace** (boolean, 可選, 預設 false): 是否使用世界座標系。若為 true，Tag 位置為世界座標；若為 false，Tag 位置為相對於資產原點的局部座標。
- 附著策略 (二選一) :
 - **localPosition** ([float, float, float]): 基於位置 (by-pos)，相對於資產原點的局部座標。
 - **attachPrimPath** (string): 基於原語 (by-prim)，USD Prim 的路徑。

範例:

```
tags:
- tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1a"
  name: "Flow Sensor"
  kind: "sensor"
  eu_unit: "m³/h"
  worldSpace: false
  attachPrimPath: "/Pump/Outlet"
- tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1b"
  name: "Temperature Indicator"
  kind: "indicator"
  eu_unit: "°C"
  worldSpace: false
  localPosition: [0.5, 0.0, 1.2]
```

3.6 Tag 附著策略

3.6.1 基於位置 (by-pos) : `localPosition`

適用場景:

- Tag 位置固定，不隨模型幾何變化而變化。
- 簡單的資產，Tag 數量少。

優點:

- 簡單直觀，易於理解和實作。
- 不依賴 USD Prim 結構。

缺點:

- 對模型版本變更敏感：如果模型幾何發生變化，Tag 位置可能不再準確。
- 無法自動跟隨模型的局部變換。

範例:

```
tags:  
- tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1b"  
  name: "Pressure Sensor"  
  kind: "sensor"  
  eu unit: "bar"  
  worldSpace: false  
  localPosition: [1.0, 0.0, 0.5] # 相對於資產原點的局部座標
```

3.6.2 基於原語 (by-prim) : `attachPrimPath`

適用場景:

- Tag 需要附著在特定的幾何元素上（如閥門的出口、泵的入口）。
- 模型可能會進行版本更新，但 Prim 結構保持穩定。

優點:

- **版本化友好:** 只要 Prim 路徑保持不變，Tag 位置會自動跟隨模型的局部變換。
- **精確附著:** Tag 可以精確附著在特定的幾何元素上。

缺點:

- 需要 USD 模型具有清晰的 Prim 結構。
- 如果 Prim 路徑變更，Tag 附著會失效。

範例:

```
tags:
- tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1a"
  name: "Flow Sensor"
  kind: "sensor"
  eu_unit: "m³/h"
  worldSpace: false
  attachPrimPath: "/Pump/Outlet" # 附著在 Pump 的 Outlet Prim 上
```

最佳實踐:

- **優先使用 by-prim:** 對於需要長期維護的資產，優先使用 `attachPrimPath`，以提高對模型版本變更的耐受性。
- **命名規範:** USD Prim 應遵循清晰的命名規範，例如 `/Asset/Component/SubComponent`。
- **文件化:** 在 USD 模型中添加註釋，說明關鍵 Prim 的用途和穩定性。

3.7 metadata (元數據)

類型: `object`

必填: 否

說明:

記錄資產的元數據，支援資產生命週期管理。

欄位:

- **author** (`string`, 可選): 資產的創建者。
- **version** (`string`, 可選): 資產的版本號，建議使用語義化版本 (Semantic Versioning)，例如 `1.0.0`。
- **created_at** (`string`, 可選): 資產的創建時間，使用 ISO 8601 格式，例如 `2025-10-22T10:30:00Z`。
- **updated_at** (`string`, 可選): 資產的最後更新時間，使用 ISO 8601 格式。

範例:

```
metadata:
  author: "Michael Lin"
  version: "1.0.0"
  created_at: "2025-10-22T10:30:00Z"
  updated_at: "2025-10-22T15:45:00Z"
```

4. 完整範例

4.1 範例 1: 泵（Pump） - 使用 by-prim

```
asset_id: "018c3f7e-8a2b-7c3d-9e4f-5a6b7c8d9e0f"
name: "Centrifugal Pump Model A"
description: "High-efficiency centrifugal pump for water circulation"
model_ref: "@/assets/pumps/centrifugal_pump_a.usd@</Pump>"
units:
  length: "m"
default_xform:
  translation: [0.0, 0.0, 0.0]
  rotation: [0.0, 0.0, 0.0]
  scale: [1.0, 1.0, 1.0]
tags:
- tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1a"
  name: "Inlet Flow Sensor"
  kind: "sensor"
  eu_unit: "m³/h"
  worldSpace: false
  attachPrimPath: "/Pump/Inlet"
- tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1b"
  name: "Outlet Pressure Sensor"
  kind: "sensor"
  eu_unit: "bar"
  worldSpace: false
  attachPrimPath: "/Pump/Outlet"
- tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1c"
  name: "Motor Temperature Indicator"
  kind: "indicator"
  eu_unit: "°C"
  worldSpace: false
  attachPrimPath: "/Pump/Motor"
metadata:
  author: "Michael Lin"
  version: "1.0.0"
  created_at: "2025-10-22T10:30:00Z"
  updated_at: "2025-10-22T10:30:00Z"
```


4.2 範例 2: 閥門 (Valve) - 使用 by-pos

```
asset_id: "018c3f7e-8a2b-7c3d-9e4f-5a6b7c8d9e10"
name: "Ball Valve DN50"
description: "Manual ball valve, DN50, PN16"
model_ref: "/assets/valves/ball_valve_dn50.usd"
units:
  length: "m"
default_xform:
  translation: [0.0, 0.0, 0.0]
  rotation: [0.0, 0.0, 0.0]
  scale: [1.0, 1.0, 1.0]
tags:
  - tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f2a"
    name: "Valve Position Indicator"
    kind: "indicator"
    eu_unit: "%"
    worldSpace: false
    localPosition: [0.0, 0.0, 0.15] # 閥門中心上方 15cm
  - tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f2b"
    name: "Inlet Pressure Sensor"
    kind: "sensor"
    eu_unit: "bar"
    worldSpace: false
    localPosition: [-0.1, 0.0, 0.0] # 閥門入口側

metadata:
  author: "Michael Lin"
  version: "1.0.0"
  created_at: "2025-10-22T11:00:00Z"
  updated_at: "2025-10-22T11:00:00Z"
```

5. 驗證規則

5.1 必填欄位驗證

- `asset_id`: 必須為有效的 UUIDv7 格式。
- `name`: 不能為空字串。
- `model_ref`: 必須為有效的 USD 路徑或 Reference。
- `units.length`: 必須為 `m`、`cm` 或 `mm`。

5.2 Tag 驗證

- `tag_id`: 必須為有效的 UUIDv7 格式，且在資產內唯一。
- `kind`: 必須為預定義的類型（`sensor`、`actuator`、`indicator`、`control_point` 等）。

- **附著策略:** 必須且僅能指定 `localPosition` 或 `attachPrimPath` 之一。
- `attachPrimPath`: 如果指定, 必須為有效的 USD Prim 路徑。

5.3 縮放約束

- `default_xform.scale`: 建議為等比縮放 $[s, s, s]$, 其中 $0.5 \leq s \leq 2.0$ 。
- 如果需要非均勻縮放, 必須在 FDL 中明確聲明並通過驗證。

5.4 單位一致性

- `units.length` 必須與 USD 模型的 `metersPerUnit` 元數據一致。
- 如果不一致, 應在載入時進行單位轉換。

6. 與 FDL v0.1 的整合

IADL v1.0 定義單個資產, FDL v0.1 定義工廠佈局。兩者的整合方式:

1. **資產引用:** FDL 中的 `AssetInstance` 透過 `asset_id` 引用 IADL 定義的資產。
2. **變換覆蓋:** FDL 中的 `transform` 會覆蓋 IADL 中的 `default_xform`。
3. **Tag 覆蓋:** FDL 中的 `tag_overrides` 可以覆蓋 IADL 中的 Tag 屬性 (如 `eu_unit`、`localPosition`)。

範例:

```
# FDL v0.1
assets:
- asset_id: "018c3f7e-8a2b-7c3d-9e4f-5a6b7c8d9e0f" # 引用 IADL 定義的泵
  instance_id: "pump_001"
  transform:
    translation: [10.0, 5.0, 0.0] # 覆蓋 IADL 中的 default_xform
    rotation: [0.0, 0.0, 90.0]
    scale: [1.0, 1.0, 1.0]
  tag_overrides:
    - tag_id: "018c3f7e-9b3c-7d4e-8f5a-6b7c8d9e0f1a"
      eu_unit: "L/min" # 覆蓋 IADL 中的 eu_unit
```

7. 最佳實踐

7.1 使用 UUIDv7

- **時間排序性:** UUIDv7 包含時間戳，便於按創建時間排序和查詢。
- **分散式友好:** 在分散式系統中生成 UUIDv7 不會產生衝突。

7.2 優先使用 by-prim

- **版本化友好:** `attachPrimPath` 對模型版本變更具有更好的耐受性。
- **清晰的 Prim 結構:** 確保 USD 模型具有清晰、穩定的 Prim 命名規範。

7.3 限制縮放

- **等比縮放:** 製造業資產通常要求等比縮放，避免非均勻縮放導致的問題。
- **縮放範圍:** 限制縮放範圍在 0.5 到 2.0 之間，避免過度縮放導致的視覺和物理問題。

7.4 單位統一

- **統一使用米 (m) :** 建議所有資產統一使用米作為長度單位，簡化跨系統整合。
- **元數據一致性:** 確保 IADL 中的 `units.length` 與 USD 模型的 `metersPerUnit` 一致。

7.5 元數據管理

- **語義化版本:** 使用語義化版本號（如 1.0.0）管理資產版本。
- **時間戳:** 記錄創建和更新時間，便於追蹤資產生命週期。

8. 參考文件

- [FDL v0.1 規格文件](#)
- [軟體設計文件 v2.1](#)
- [幾何座標系統與 Tag 對齊設計](#)

- [UUIDv7 規範](#)
- [OpenUSD 官方文件](#)