

箱庭カメラ 受け入れテスト

一覧と結果（2026 年 10 月 24 日の実行、2026 年 10 月 25 日 版） 合同会社箱庭ラボ

1. この文書について

箱庭のカメラが何をどこまでできるかを、31 の項目で確かめた結果です。項目はすべて OpenSCENARIO のシナリオで書き、自動で流して測りました。項目ごとに 5 つの段階で確かめています。

段階	意味
実装	機能がある
正本一致	描画（GPU、Godot）の画像が、Python で書いた正本の計算と一致する
根拠一致	規格・論文・実測の値に、決めた幅で入る
再現性	同じシナリオを何回流しても、同じ画像になる（ビット単位）。箱庭の時刻同期（ロックステップ）で流した場合
CARLA 比較	CARLA 0.9.16 の数字を横に並べる（参考。可否には使わない）

記号：達成、承認（達成ではないが、確かめる意味がない・確かめられない理由を書いて受け入れたもの。理由は 5 章）、未達、—（未実施）。

2. まとめ

段階	達成	承認（理由つき）	未達	未実施
実装	31 / 31	0	0	0
正本一致	25 / 31	6	0	0
根拠一致	30 / 31	0	1	0
再現性	31 / 31	0	0	0
CARLA 比較	19 / 31	12	0	0

根拠一致の未達 1 は SY-03（魚眼 720p・30 Hz を実時間以上で）です。Mac（M2 Pro）では届きましたが、Windows（NVIDIA）では RTF 0.49～0.50 で届いていません。目標は両方の環境なので、未達と数えています。

2026 年 10 月 25 日に、描画サーバーの仕組みを変えたため、カメラ係を使う 5 項目（OB-01、LE-04、SY-01、SY-02、SY-03）を 3 回ずつ流し直し、すべて合格と再現性を確かめました。

3. 項目の一覧

ID	分野	項目	根拠	合格の幅	実装	正本一致	根拠一致	再現性	CARLA	確かめ方
PH-01	露出	Sunny 16 で 18 % 灰色が中間の明るさ	Sunny 16 の決まり（ISO 100・f/16・1/100 s）、太陽と空の照度から計算した値	± 2 %	達成	達成	達成	達成	承認	自動
PH-02	露出	露出の 1 段が明るさの 2 倍	露出値 EV の定義（ISO・シャッター・F 値・補正）	± 1 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
PH-03	露出	反射率の比がそのまま明るさの比	試験の板の反射率（白 0.90・灰 0.18・黒 0.031）	± 2 %	達成	達成	達成	達成	承認	自動
PH-04	色	ホワイトバランスを光に合わせると灰色が灰色	黒体の色温度（4000～9000 K）	± 2 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
PH-05	色	トーンカーブが式どおり	Godot 4.6 の ACES・フィルミック・リニアの式	± 2 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
PH-06	露出	自動露出の測光と応答	正本の測光（中央の百分位の平均の対数輝度）、2 段/秒	± 2 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
LE-01	レンズ	射影と歪みの式が OpenCV と一致	OpenCV の Brown-Conrady・Kannala-Brandt	0.001 画素	達成	達成	達成	達成	承認	自動
LE-02	レンズ	描いた画像から内部パラメータが戻る	OpenCV のキャリブレーション（calibrateCamera、fisheye.calibrate）	± 0.5 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
LE-03	レンズ	板の角が式で投影した位置に写る	板とカメラの置き方からの計算	0.5 画素	達成	達成	達成	達成	承認	自動
LE-04	レンズ	RGB と塗り分け（MuJoCo）の境目がそろう	同じ幾何（2 つの描画サーバー）	中央値 0 画素、90 % で隣の画素以内（斜めの隣 $\sqrt{2} \approx 1.41$ 画素を含む）	達成	承認	達成	達成	承認	自動
LE-05	レンズ	周辺減光と色収差が定義どおり	プロファイルの定義（隅の比、隅のずらし）	比 ± 0.005、ずれ ± 0.2 画素	達成	達成	達成	達成	達成	自動

ID	分野	項目	根拠	合格の幅	実装	正本一致	根拠一致	再現性	CARLA	確かめ方
OB-01	動く物	ほかの車が、いるはずの場所に RGB と塗り分けの両方で写る	ピンホールへの投影（車の大きさ 4.38 m × 1.78 m）と同じ幾何（2 つの描画サーバー）	中心 ±0.2 %、幅 ±3 %（角の丸み）、境目は中央値 0 画素・90 % で隣の画素以内（斜めの隣 $\sqrt{2} \approx 1.41$ 画素を含む）	達成	承認	達成	達成	承認	自動
SY-01	同期	画像の時刻が撮影を頼んだシミュレーション時刻	カメラはシミュレーションを待たせる（026）	0（同じ値）	達成	承認	達成	達成	達成	自動
SY-02	同期	全コマを撮る（抜けなし）	30 Hz の撮影時刻の数	0	達成	承認	達成	達成	達成	自動
SY-03	性能	魚眼 720p・30 Hz を実時間以上で	目標（RTF 1 以上、M2 Pro・Windows NVIDIA）	RTF ≥ 1 （環境ごと。M2 Pro と Windows NVIDIA の両方で届いて達成）	達成	承認	未達	達成	達成	自動
WX-01	空	空の輝度の分布が CIE 標準一般天空	ISO 15469 / CIE S 011、Darula・Kittler 2002	±1 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
WX-02	空	太陽と空で照らした板の明るさ	直射と空の水平面照度（ランバート面）	±3 %	達成	達成	達成	達成	承認	自動
WX-03	空	雲量に応じた空と照度（晴れ → 曇天）	CIE の 15 型、Darula・Kittler の典型の Dv/Ev	±5 %（Godot の環境光の近似が、一様でない空で数 % 低い）	達成	達成	達成	達成	達成	自動
WX-04	霧	霧の見通しが指定の値	WMO の気象光学距離（コントラスト 5 %）、Koschmieder の式	±3 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
WX-14	霧	空にかかる霧が描画距離の上限によらない	霧・雨は高さ 1 km の層の中（空は層を抜ける道のりで薄れる。仮定）	±0.5 %	達成	達成	達成	達成	承認	自動
WX-05	霧	霧の光（空気光）の明るさ	水平面照度 / π （白い散乱体）	±1 %	達成	達成	達成	達成	承認	自動
WX-06	レンズ	ベ어링グレアが ISO 9358 の定義	ISO 9358（指数 × 画像の平均）	±2 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
WX-07	雨	雨による見通しの低下	Marshall–Palmer の粒径分布、消散効率 2	±3 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
WX-08	雨	濡れた面の明るさ	Lekner・Dorf（拡散の暗くなり方）と水の膜の鏡面反射	±2 %（黒は ±7 %）	達成	達成	達成	達成	達成	自動
WX-09	雨	雨の筋の量	Garg・Nayar 2004、筋の重なり幾何	±3 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動

ID	分野	項目	根拠	合格の幅	実装	正本一致	根拠一致	再現性	CARLA	確かめ方
WX-10	ガラスの水滴	水滴の屈折（縮み方と向き）	You ほか TPAMI 2016（20～30 倍、さかさま）、薄いレンズの式	±5 %、ずれた画素 0	達成	達成	達成	達成	承認	自動
WX-11	ガラスの水滴	ガラスに当たる雨粒の数	Marshall-Palmer の流れ（落下速度と車の速度）	±2 %	達成	達成	達成	達成	承認	自動
WX-12	ガラスの水滴	水滴の動き出し（重さと走行風）	Furmidge、arXiv 2009.04059 の実験（重さだけの傾き、風だけの We 7.9）	±10 %	達成	達成	達成	達成	承認	自動
MB-01	ぶれ	モーションブラーの長さ	幾何（ $f \omega T$ 、前進の視差）、露出の真ん中が撮影時刻	±3 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
NO-01	ノイズ	ノイズの量（光子伝達）	EMVA 1288、ISO 12232 の飽和	±3 %	達成	達成	達成	達成	達成	自動
RP-01	再現性	同じシナリオを流すと同じ画像	撮影時刻とカメラ名から決まる乱数、lockstep の同期	すべて同じ	達成	承認	達成	達成	達成	自動

4. 結果（自動の測定の要約）

測った点の数、根拠に対する最大のずれ（測った値、期待した値、比）、流した回数、日付です。

ID	項目	結果
PH-01	Sunny 16 で 18 % 灰色が中間の明るさ	4 点、最大のずれ grey18_value 0.1431（期待 0.1434、比 0.9978）、3 回、2026-10-24
PH-02	露出の 1 段が明るさの 2 倍	5 点、最大のずれ normalization_vs_python 3.255e-05（期待 3.255e-05、比 1.0000）、3 回、2026-10-24
PH-03	反射率の比がそのまま明るさの比	7 点、最大のずれ grey18_cd_m2_vs_python 4395（期待 4405、比 0.9978）、3 回、2026-10-24
PH-04	ホワイトバランスを光に合わせると灰色が灰色	9 点、最大のずれ 4000K_grey_max_over_min 1.002（期待 1、比 1.0021）、3 回、2026-10-24
PH-05	トーンカーブが式どおり	6 点、最大のずれ aces_black_code 89（期待 88.49、比 1.0057）、3 回、2026-10-24
PH-06	自動露出の測光と応答	1 点、最大のずれ stops_per_s 2（期待 2、比 1.0000）、3 回、2026-10-24
LE-01	射影と歪みの式が OpenCV と一致	—
LE-02	描いた画像から内部パラメータが戻る	16 点、最大のずれ pinhole_opencv_fy 515.8（期待 514.1、比 1.0033）、3 回、2026-10-24
LE-03	板の角が式で投影した位置に写る	2 点、最大のずれ main_median_corner_error_px 0.1386（期待 0、比 inf）、3 回、2026-10-24
LE-04	RGB と塗り分け（MuJoCo）の境目がそろう	2 点、最大のずれ boundary_to_edge_p90_px 0（期待 1.414、比 0.0000）、3 回、2026-10-25
LE-05	周辺減光と色収差が定義どおり	16 点、最大のずれ vignette_r0.95 0.5203（期待 0.5211、比 0.9984）、3 回、2026-10-24
OB-01	ほかの車が、いるはずの場所に RGB と塗り分けの両方で写る	4 点、最大のずれ vehicle_width_px 160（期待 162.9、比 0.9822）、3 回、2026-10-25
SY-01	画像の時刻が撮影を頼んだシミュレーション時刻	1 点、最大のずれ response_delay_max_usec 0（期待 0、比 1.0000）、3 回、2026-10-25
SY-02	全コマを撮る（抜けなし）	1 点、最大のずれ missing_frames 0（期待 0、比 1.0000）、3 回、2026-10-25
SY-03	魚眼 720p・30 Hz を実時間以上で	1 点、最大のずれ rtf 2.25（期待 1、比 2.2500）、3 回、2026-10-25。環境別：Mac（M2 Pro） rtf 2.25 達成、Windows NVIDIA RTF 0.49～0.50 未達（2026-10-24）
WX-01	空の輝度の分布が CIE 標準一般天空	63 点、最大のずれ sky_z58_a47 2353（期待 2355、比 0.9991）、3 回、2026-10-24
WX-02	太陽と空で照らした板の明るさ	8 点、最大のずれ grey18_cd_m2 4395（期待 4405、比 0.9978）、3 回、2026-10-24
WX-03	雲量に応じた空と照度（晴れ → 曇天）	1 点、最大のずれ overcast_grey18_cd_m2 497（期待 515.4、比 0.9643）、3 回、2026-10-24
WX-04	霧の見通しが指定の値	1 点、最大のずれ visibility_m 60（期待 60、比 1.0000）、3 回、2026-10-24
WX-14	空にかかる霧が描画距離の上限によらない	1 点、最大のずれ sky_far1000_over_far300 1（期待 1、比 1.0000）、3 回、2026-10-24
WX-05	霧の光（空気光）の明るさ	4 点、最大のずれ airlight_cd_m2 2.447e+04（期待 2.447e+04、比 0.9998）、3 回、2026-10-24
WX-06	ペーリンググレアが ISO 9358 の定義	4 点、最大のずれ grey18_added 0.02533（期待 0.02533、比 0.9997）、3 回、2026-10-24
WX-07	雨による見通しの低下	1 点、最大のずれ visibility_m 699.6（期待 698.7、比 1.0014）、3 回、2026-10-24
WX-08	濡れた面の明るさ	3 点、最大のずれ black_wet_cd_m2 197.3（期待 189.6、比 1.0409）、3 回、2026-10-24

ID	項目	結果
WX-09	雨の筋の量	2 点、最大のずれ main_10mm_h_mean_coverage 0.003974（期待 0.00395、比 1.0060）、3 回、2026-10-24
WX-10	水滴の屈折（縮み方と向き）	2 点、最大のずれ main_mismatched_pixels 0（期待 0、比 1.0000）、3 回、2026-10-24
WX-11	ガラスに当たる雨粒の数	2 点、最大のずれ frames_water_relative_difference 2.021e-11（期待 0、比 inf）、3 回、2026-10-24
WX-12	水滴の動き出し（重さと走行風）	—
MB-01	モーショントラッキングの長さ	2 点、最大のずれ grey18_black_edge_px 13.87（期待 13.76、比 1.0077）、3 回、2026-10-24
NO-01	ノイズの量（光子伝達）	3 点、最大のずれ sky800_variance_G 0.0006773（期待 0.0006821、比 0.9930）、3 回、2026-10-24
RP-01	同じシナリオを流すと同じ画像	1 点、最大のずれ different_pixels 0（期待 0、比 1.0000）、3 回、2026-10-24

5. 承認の理由

ID	段階	理由
PH-01	CARLA 比較	反射率の分かる 18 % 灰の板を CARLA に置けない（prop の材質は固定で、変えるには UE エディタでの作り直しが要る）。照度の絶対値も CARLA からは取れない。
PH-03	CARLA 比較	反射率の分かる白・灰・黒の板を CARLA に置けない。面の反射率が分からないので、比を根拠と比べられない。
LE-01	CARLA 比較	式が OpenCV と一致するかの確かめ。CARLA の歪み（lens_k、lens_kcube）は OpenCV の型ではなく、同じ物差しがない
LE-03	CARLA 比較	市松の板を式で投影した位置と比べる。CARLA に市松の板を置くには地図（Unreal のアセット）の編集が要り、同じ条件をそろえられない
LE-04	正本一致	2 つの描画サーバー（Godot と MuJoCo）の画像どうしを比べる項目。両方が同じ幾何を描くことを直接確かめるので、Python の正本の出番がない
LE-04	CARLA 比較	2 つの描画サーバーの境目のずれの確かめ。CARLA は RGB と塗り分けを 1 つのエンジンで描くので、このずれは起きない
OB-01	正本一致	動く物の位置は、ピンホールの投影の式と 2 つの描画どうしで確かめる。Python の正本は動く物を描かない
OB-01	CARLA 比較	RGB と塗り分けで動く物がそろうかの確かめ。CARLA は 1 つのエンジンで描くので、ずれは起きない（CARLA が動く物を描くことは対応表に書く）
SY-01	正本一致	時刻と受け渡しの仕組みの確かめで、画像の計算ではない
SY-02	正本一致	全コマを撮る仕組みの確かめで、画像の計算ではない
SY-03	正本一致	速さの測定で、画像の計算ではない
WX-02	CARLA 比較	反射率の分かる板を置けず、太陽と空の照度の絶対値も CARLA から取れない（単位が物理量でない）。
WX-14	CARLA 比較	箱庭の作りに固有の確かめ（空にかかる霧を、描画距離の上限から切り離れた直し）
WX-05	CARLA 比較	空気光の期待値は水平面照度 ÷ π で、照度の絶対値が CARLA から取れない。
WX-10	CARLA 比較	CARLA 0.9 系（比べた版）にガラスの水滴が無い。UE5.8 開発版にはレンズの雨滴の表現があるが、比べていない
WX-11	CARLA 比較	CARLA 0.9 系（比べた版）にガラスの水滴が無い。UE5.8 開発版にはレンズの雨滴の表現があるが、比べていない
WX-12	CARLA 比較	CARLA 0.9 系（比べた版）にガラスの水滴が無い。UE5.8 開発版にはレンズの雨滴の表現があるが、比べていない
RP-01	正本一致	同じシナリオの画像どうしを比べる項目で、正本の出番がない

6. CARLA の数字（参考）

CARLA 0.9.16（Unreal Engine 4）を同じ Windows PC（NVIDIA の GPU）で動かし、できるだけ同じ形で測った数字です。可否には使いません。CARLA の地図や素材は変えていないので、条件が違うところはメモに書きました。

ID	測り方	値	メモ
PH-01	参考値：Sunny 16（ISO 100、f/16、1/100 s）の正午の晴れで、各場所の 8 bit の平均（B の 1/100 s の行）	sky_zenith_side_8bit_sunny16 14.98、sky_low_8bit_sunny16 25.73、road_near_8bit_sunny16 38.13、road_far_8bit_sunny16 49.54、ground_beyond_shoulder_8bit_sunny16 25.31、white_line_8bit_sunny16 36.77	18 % 灰の板が CARLA に置けないので、板の値は出していない。参考に、同じ露出での路面・空・白線の 8 bit の値を入れた（箱庭の同じ場所の値と並べられる）。
PH-02	手動 ISO 100 と 200（f/16、1/100 s）、同じ場面、応答曲線で線形に戻した値の比	road_near_iso200_over_iso100 2.089（期待 2）、road_far_iso200_over_iso100 2.087（期待 2）、sky_low_iso200_over_iso100 2.084（期待 2）、ground_beyond_shoulder_iso200_over_iso100 2.041（期待 2）	応答曲線は ISO 100 でシャッターを振って求めたもの。ISO を変えたときも同じ曲線に乗るかの検算を兼ねる。
PH-03	参考値：白線 ÷ 路面の近く、地面 ÷ 路面の近く、路面の遠く ÷ 路面の近くの線形の比（B の応答曲線の当てはめのずらし）	white_line_over_road_near 0.8395、ground_over_road_near 0.6538、road_far_over_road_near 1.303	値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。白線は画像ごとに一番明るい 6 px の窓。CARLA の白線はかすれの模様があり、路面より暗く出る。
PH-04	カメラの temp（ホワイトバランス）4000・5800・9000（手動 ISO 800、f/16、1/100 s、正午の晴れ）で、路面の近くの線形の R・G・B の最大 ÷ 最小	road_near_temp4000_max_over_min 2.529（期待 1）、road_near_temp5800_max_over_min 1.1（期待 1）、road_near_temp9000_max_over_min 1.588（期待 1）	CARLA は太陽の色温度を指定できない（太陽の色は高度と大気で決まる）。そのため箱庭の「光の色温度に合わせたホワイトバランスで灰色が灰色」とは条件が違い、ここではカメラの temp を変えたときの路面の色の偏りを出している。路面の反射率の色（灰色かどうか）も分からない。値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。

ID	測り方	値	メモ
PH-05	B の応答曲線（8 bit 10～245）を UE4 の FilmToneMap（CARLA の既定 slope 0.88、toe 0.55、shoulder 0.26、black_clip 0、white_clip 0.04）に当てはめ、露出の倍率 1 つだけを動かしたときの 8 bit の誤差（RMS）。出力の符号化は 2.2 乗と sRGB の両方	rms_8bit_filmic_gamma22 41.17、exposure_scale_gamma22 4.063、rms_8bit_filmic_srgb 41.63、exposure_scale_srgb 4.096、rms_8bit_filmic_fitted_params_gamma22 3.734、fitted_slope 0.55、fitted_toe 0.7、fitted_shoulder 0.7、fitted_exposure_scale 3.32	CARLA の応答曲線は、6 つの場所の曲線を露出の向きにずらして重ねたもの（色は (R+G+B)/3）。exposure_scale は応答曲線の単位（正午の路面の近く × 0.01 s）からトーンマップの入力への倍率。CARLA の色の行列（AP1）とブルームは中性の灰色では効かないとして無視した。既定のパラメータでは合わず（誤差 8 bit で約 40）、slope・toe・shoulder を動かすと合う（fitted_*）。模様のある場所の 8 bit を平均してから曲線を作ったので、曲線の傾きが実際より寝ている可能性がある（平均と非線形の順番の違い）。
PH-06	自動露出（histogram）で、太陽の高度を 1 tick で 5° ↔ 57.3° に変え、画像の平均（応答曲線で線形に戻す）の log2 が最終値へ向かう速さ（変化の 20～80 % の間の傾き）。既定の露出の幅（exposure_min_bright 10、exposure_max_bright 12）と、広げた幅（1～20）の 2 通り	default_range_dark_to_bright_stops_per_s 0.1687、default_range_dark_to_bright_image_change_after_step_stops 0.1885、default_range_bright_to_dark_stops_per_s 0.1539、default_range_bright_to_dark_image_change_after_step_stops - 0.1349、wide_range_dark_to_bright_stops_per_s 1.017、wide_range_dark_to_bright_image_change_after_step_stops - 1.38、wide_range_bright_to_dark_stops_per_s 0.5571、wide_range_bright_to_dark_image_change_after_step_stops 1.953	CARLA の既定は exposure_speed_up 3.0、exposure_speed_down 1.0（段/秒）。箱庭は上げ下げとも adaptation_speed（既定 2 段/秒）。既定の幅では露出がほとんど動かない（この場面の明るさの差が幅の外）ので、速さは意味を持たない。広げた幅の値が露出の追い方を表す。step の直後に場面が変わり、そのあと露出が追う動きを、画像の平均から測っている。
LE-02	ピンホール 1280×720、fov 102.45°（期待 fx = fy = 514.3、cx = 640、cy = 360）。(1) コーン 16 個（前方 8・12・16・24 m、横 ±1.5・±3 m）の instance セグメンテーションの重心と置いた位置から fx・cx を最小二乗で、fy = fx として cy と重心の高さを。(2) 深度の画像の路面（v = cy + fy·h/z、h = 1.5 m）から fy・cy	fx_cones 514.9（期待 514.1）、cx_cones 639.4（期待 640）、cy_cones_with_fy_eq_fx 352.6（期待 360）、cone_centroid_height_m 0.3825、cones_matched 16（期待 16）、fy_depth_road 514.1（期待 514.1）、cy_depth_road 359.5（期待 360）	CARLA に市松模様の板は無いので、OpenCV のキャリブレーションではなく、位置の分かる物（コーン）と深度から当てはめた。重心は物の中心と一致しないので、重心の高さを未知数にした（fy と重心の高さは積でしか決まらないので、fy は深度の路面から出した）。CARLA に魚眼は無いのでピンホールだけ。
LE-05	周辺減光：既定と lens_circle_multiplier 0 の線形の明るさの比を半径ごとに（隅で 1）。色収差：chromatic_aberration_intensity 0（既定）と 1（offset 0）で、右下の隅（x 1100～1271、y 600～711）の R と B のずれ（相互相関、整数画素）	vignette_default_over_off_r0.5 1（期待 1）、vignette_default_over_off_r0.75 1（期待 1）、vignette_default_over_off_r0.95 1（期待 1）、corner_red_blue_shift_default_px 0、corner_red_blue_shift_ca1_px 0、corner_red_blue_shift_ca5_px 0	CARLA の既定は lens_circle_multiplier 0（周辺減光なし）、chromatic_aberration_intensity 0。CARLA の色収差の intensity は単位の無い値で、箱庭の「隅のずれし（画素）」とは定義が違う。
SY-01	同期モード（1/30 s）で、RGB・深度・塗り分けの image.timestamp とその tick のスナップショットの時刻の差の最大（70 s × 3 回）	stamp_error_max_usec 0（期待 0）	測ったのはピンホールの案 1（合わせた位置）。
SY-02	同期モードで、tick ごとに 3 出力がそろったフレームの frame 番号の抜けの数（70 s × 3 回）	missing_frames 0（期待 0）、frames 4631	
SY-03	ピンホールの案 1（1280×720、102.45°、RGB+深度+塗り分け、同期 30 Hz）の RTF（30 s 以降、70 s × 3 回、パフォーマンス最大化の設定のあと）。参考：案 2（箱庭の魚眼と同じ 5 面、764×764・90°、RGB+深度+塗り分けで 15 台）の RTF	pinhole_rtf_run1 0.7268、pinhole_rtf_run2 0.739、pinhole_rtf_run3 0.7304、cube5_reference_rtf_run1 0.368、cube5_reference_rtf_run2 0.3634、cube5_reference_rtf_run3 0.3631	CARLA に魚眼のカメラは無いので、箱庭の SY-03（魚眼）とは条件が違う。cube5 は魚眼の描く量（立方体の面）をそろえた参考。天候は Town04 の既定。RTX 4060 Laptop、NVIDIA の電源管理は CARLA には設定していない（既定）。

ID	測り方	値	メモ
WX-01	正午の晴れ（太陽の方位 180°、高度 57.3°）で、カメラを仰角 15・30・45・60・75・89°、方位 8 方向に向け、画像の中央（160×120 px）の空の線形の明るさを、仰角 89° の平均（天頂）で割り、CIE の 12 型（晴天）の相対輝度と比べた比	measured_over_ciel2_median 1.076（期待 1）、 measured_over_ciel2_min 0.341（期待 1）、 measured_over_ciel2_max 1.499（期待 1）、 sky_p15_az90_over_zenith 1.212、sky_p15_az180_over_zenith 0.4133、sky_p15_az270_over_zenith 1.163、 sky_p15_az0_over_zenith 1.357、sky_p45_az90_over_zenith 0.8025、sky_p45_az180_over_zenith 1.137、 sky_p45_az270_over_zenith 0.7961、sky_p45_az0_over_zenith 0.5451、sky_p75_az90_over_zenith 0.8572、 sky_p75_az180_over_zenith 2.074、sky_p75_az270_over_zenith 0.9751、sky_p75_az0_over_zenith 0.7561	CARLA の空は UE の大気（物理モデル）で、CIE の型は指定できない。比の分布だけを出した。方位は北から時計回り。撮影は手動 ISO 3200、f/16、1/100 s。measured_over_ciel2 は仰角 30° 以上の 40 方向（15° は道の脇の木と斜面が窓に入るので除いた。sky_p15_* は参考）。値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。
WX-02	参考値：正午の晴れの、空の天頂寄り・空の低い所 ÷ 路面の近くの線形の比	sky_zenith_side_over_road_near 0.4127、sky_low_over_road_near 0.6737	値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。
WX-03	同じ手動露出（ISO 800、f/16、1/100 s）で cloudiness 0 → 100（雨なし、正午）にしたときの、面の線形の明るさの比	road_near_overcast_over_clear 0.2764（期待 0.113）、 road_far_overcast_over_clear 0.3332（期待 0.113）、 ground_beyond_shoulders_overcast_over_clear 0.2513（期待 0.113）、overcast_sky_low_relative 測れない	expected の 0.113 は、箱庭の空のモデルの水平面照度の比（全天曇り 11.3 klx ÷ 晴れ 100 klx、高度 57.3°、Darula・Kittler の典型の Dv/Ev 0.10）。CARLA の cloudiness 100 では空が真っ黒（8 bit で 0）になる（窓ありでも同じ）。RenderOffScreen のせいではない）。値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。
WX-04	fog_density 0・10・20・30・50・70・100（fog_distance 0、fog_falloff 0.2、正午、手動 ISO 800）で、車線の中の路面が地平線（361 行）の明るさに近づく速さから 5 % の閾値の見通し（気象光学距離）を出した $((L_h - L(d)) / (L_h - L(5))) = \exp(-\sigma(d-5))$ 、d = 10・20・40 m、V = $-\ln 0.05 / \sigma$ の中央値	fog_density0_visibility_m 測れない、fog_density0_sigma_median -0.01328、fog_density10_visibility_m 測れない、fog_density10_sigma_median -0.009147、fog_density20_visibility_m 測れない、fog_density20_sigma_median -0.01044、fog_density30_visibility_m 測れない、fog_density30_sigma_median -0.02553、fog_density50_visibility_m 52.81、fog_density50_sigma_median 0.05673、fog_density70_visibility_m 48.98、fog_density70_sigma_median 0.06117、fog_density100_visibility_m 40.14、fog_density100_sigma_median 0.07464	CARLA の fog_density は見通しの単位ではないので、箱庭の visualRange との対応を出すための表。 σ が負や不揃いのときは、40 m までに霧として測れる減衰が無い（見通し null）。fog_falloff（高さによる薄れ）は 0.2。値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。

ID	測り方	値	メモ
WX-05	参考値：fog_density 100 の空（空の低い所）÷ 霧なしの路面の近くの線形の比（手動 ISO 800、f/16、1/100 s）	fog100_sky_low_over_clear_road_near 0.6437	値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。霧の空の明るさの期待値（水平面照度 ÷ π ）は照度の絶対値が要るので、比だけを出した。
WX-06	夕方の逆光（太陽の高度 5°、カメラの正面）、自動露出で、bloom_intensity と lens_flare_intensity を既定（0.675、0.1）と 0 で撮り、日陰（路面の近く、草地）に足された量 ÷ 画像全体の平均（応答曲線で線形に戻した値。同じ露出として扱う）を「等価なグレアの指数」とした	road_near_equivalent_glare_index 0.04331、 ground_beyond_shoulders_equivalent_glare_index 0.03467	CARLA に veiling glare（レンズ内の散乱で画像全体に一樣に足される光）そのものは無い。 bloom とフレアは明るい所の周りに局所的に広がる効果で、ISO 9358 の定義とは違う。自動露出なので 2 枚の露出が同じとは限らない。
WX-07	cloudiness 100、precipitation 30・80（fog 0、正午、手動 ISO 800）で、WX-04 と同じ方法（路面が地平線の明るさに近づく速さ、5%）の見通し	precipitation30_visibility_m 測れない、precipitation80_visibility_m 測れない、no_rain_overcast_visibility_m 測れない	CARLA の precipitation は mm/h ではないので、Marshall-Palmer の式の期待値とは並べるだけ。 CARLA の雨そのものに見通しを下げる消散があるかを見る表。値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。
WX-08	正午の晴れ、手動 ISO 800、wetness 0 → 100、さらに precipitation_deposits 80（水たまり）で、面の線形の明るさの比（板の代わりに路面・白線・草地）	road_near_wet_over_dry 0.3014、road_near_wet_puddles_over_dry 0.2078、road_far_wet_over_dry 0.3177、 road_far_wet_puddles_over_dry 0.3753、white_line_wet_over_dry 0.6664、white_line_wet_puddles_over_dry 0.6458、 ground_beyond_shoulders_wet_over_dry 0.1943、 ground_beyond_shoulders_wet_puddles_over_dry 0.1942	反射率の分かる板が置けないので、CARLA の面の濡れ方の比だけを出した（Lekner・Dorf の式との比較はできない）。値は B のシャッターの振り（既定の後処理、手動 ISO 100・f/16、1/8000～1 s を 1/3 段ずつ 40 段）から求めた応答曲線の逆で線形に戻し、露出（ISO・F 値・シャッター）で割った相対の明るさ（正午の路面の近くを 1）。
WX-09	cloudiness 100、precipitation 0・30・80、手動 ISO 800 で 10 フレームずつ撮り、右の岩と木の部分（x 1000～1269、y 150～449）で、雨なしの同じ番号のフレームとの差が 8 bit で 8 を超える画素の割合の平均	precipitation30_streak_coverage 0.006789、 precipitation80_streak_coverage 0.04851	CARLA の cloudiness 100 では空が黒いので、空ではなく岩と木の部分で測った。雨なしとの差には、雨の筋のほかに濡れや暗くなる効果も入る。 箱庭は画像全体の筋の重なり平均。

ID	測り方	値	メモ
MB-01	向きを 0.5 rad/s で回し（1 tick 0.955°、最後の tick が撮る向き）、ガードレールの影から日の当たる路面へ上がる縁の 10～90 % の幅（558～562 行の中央値）を、静止と比べた。手動 ISO 800、f/29.2、shutter_speed 30	edge_width_yaw05_px 4、edge_width_static_px 3、expected_0p8_x_geometric_px 8.746、edge_x_px 910、width_increase_over_expected 0.1143（期待 1）、edge_width_yaw05_blur_intensity0_px 3、edge_width_yaw05_blur_intensity1_px 4	CARLA のモーションブラーは motion_blur_intensity 0.45、motion_blur_max_distortion 0.35、motion_blur_min_object_screen_size 0.1（既定）で決まり、シャッター速度とは関係しない。幾何の移動量は $F \cdot (1 + ((x - 640)/F)^2) \cdot 0.5$ rad/s・(1/30 s)。width_increase は (回したときの幅 - 静止の幅) ÷ (0.8 × 移動量)。前進のぶれは白線に沿う向きに出るので測れない。intensity 0 で +0 px、0.45 と 1.0 で +1 px と、intensity を上げて伸びないので、max_distortion（画面の割合での上限）で頭打ちになっているとみている（確かめてはいない）。前回の条件 6（2026-10-24、手動 ISO 100、f/29.2、1/30、同じ 0.5 rad/s、同じ intensity）では「CARLA のぶれは幾何より長い」としたが、あれは白線の左の縁（560 行）で測った値（静止 2 px → 回転 17 px）。同じ画像をガードレールの影の縁で測ると 7 → 11 px（+4）で、白線の縁だけが大きく出ていた。暗い画像（縁の近くの 8 bit 平均 27）の細い白線（幅 10 px 前後）は、ぼけると隣の暗い部分とつながって 10～90 % の幅が大きく出る。ISO 800 の明るい画像では、白線と路面の差が小さく、白線の縁は静止でも 16 px と出て測れない。そのため今回は、濃い影の縁（影 → 日の当たる路面）で測った。もう 1 つ、最初の MB-01 の撮影は、保存したフレームが撮る向きの 1 tick 前（0.955° ずれ）だったので直して撮り直した（縁の位置が静止 911、回転 910 にそろった）。
NO-01	静止した場面（手動 ISO 800、f/16、1/100 s）を 30 フレーム撮り、路面の近くと空の低い所の G の、時間方向の標準偏差（画素ごとの平均）と、1 枚の中の空間の標準偏差	road_near_temporal_std_8bit_G 0.5421、road_near_spatial_std_8bit_G 5.678、sky_low_temporal_std_8bit_G 0.4037、sky_low_spatial_std_8bit_G 3.48	CARLA の RGB にはセンサーノイズ（光子・読み出し）のモデルが無い。時間方向の揺れは TAA などの描画の揺れだけ。空間の標準偏差は面の模様（テクスチャ）を含む。箱庭の NO-01（EMVA 1288 の分散 ÷ モデル）とは比べられない。
RP-01	同じ設定（正午の晴れ、手動 ISO 800）で CARLA を起動し直して 2 回流し、settle 60 tick のあとの 10 フレームの画像を比べた	identical_frames 0（期待 10）、different_pixels_max 8368（期待 0）、different_pixels_mean 7739（期待 0）	天候と姿勢は毎回すべて指定し、同期モードで同じ tick 数を回した。

7. 条件と注意

- この版での改訂（2026 年 10 月 25 日）：LE-04 と OB-01 の境目の基準を、判定の実際に合わせて「90 % で隣の画素以内（斜めの隣 $\sqrt{2} \approx 1.41$ 画素を含む）」と書き直した（以前の表記は「1 画素」で、判定は 1.5 画素以下だった）。SY-03 を環境別にし、Windows の未達を数えた。
- 箱庭のカメラ：色の絵（RGB）を Godot、距離と物の種類の塗り分けを MuJoCo が描く。撮影の時刻と姿勢はカメラ係が決め、両方に同じ値を渡す。
- シナリオ：OpenSCENARIO 1.2。天候は Environment（TimeOfDay、Weather、RoadCondition）。試験の板とカメラはシナリオの物として置く。
- 画像はトーンマップの前の値で測る。
- CARLA との比較の数字は、この文書に書いた設定で測った結果です。CARLA の機能や性能が一般にどうかを言うものではありません。
- シミュレーションの画像は、実際のカメラの映像や、それを使うソフトウェアの性能・安全性を保証しません。
- CARLA と Unreal Engine は、それぞれの開発元・権利者のものです。OpenSCENARIO は ASAM e.V. の標準規格です。