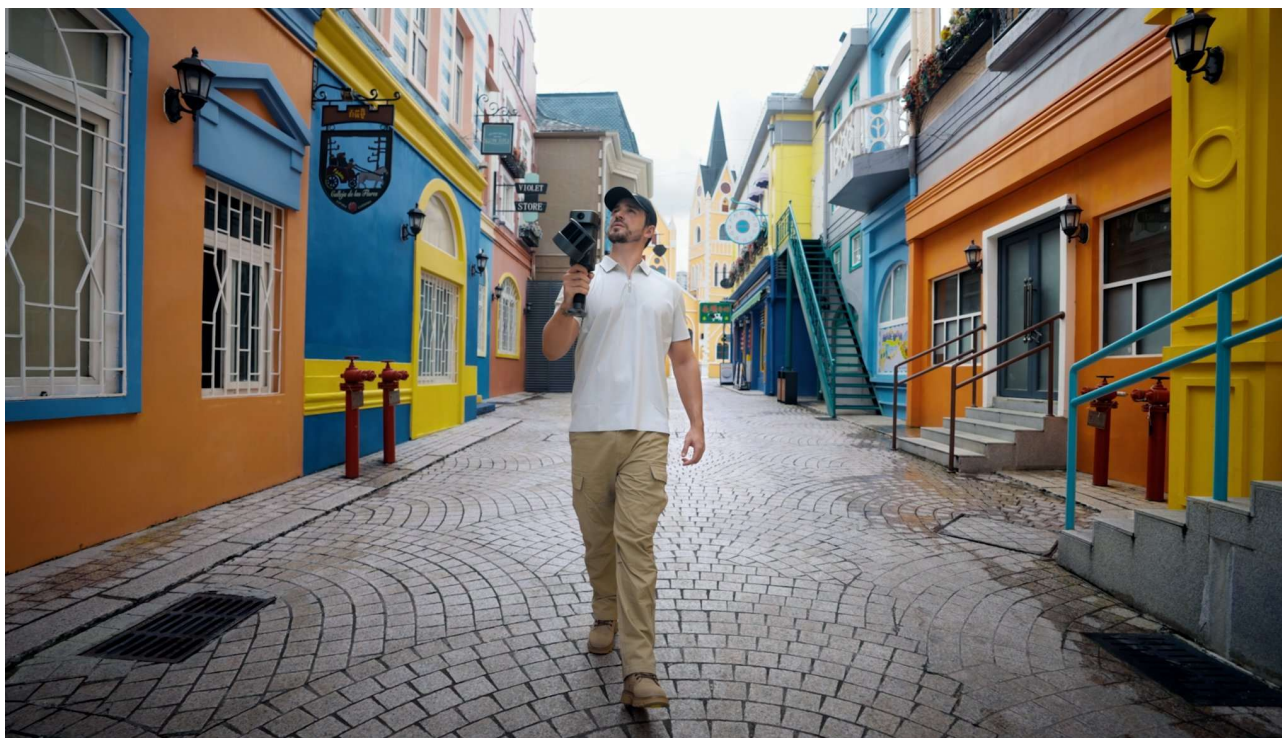


XGRIDS

Whitepaper nauwkeurigheidvalidatie

XGRIDS Lixel L3 – Validatie van de nauwkeurigheid van de puntenwolk

Verslag van de geometrische nauwkeurigheid van puntenwolken van de handheld mobiele laserscanner XGRIDS Lixel L3 door middel van validatie van de relatieve nauwkeurigheid.



5 mm

Gespecificeerde nauwkeurigheid @1 σ
(typisch)

20 sets

Onafhankelijke scansets met 7 units

≈507 m²

Samengestelde testlocatie binnen

1. Inleiding

Handheld mobiele laserscansystemen zijn dankzij hun efficiënte workflow voor data-acquisitie, geautomatiseerde verwerking en rijke puntenwolksproducten uitgegroeid tot een onmisbaar instrument in de landmeetkunde en ruimtelijke documentatie.

Nu hun toepassing zich uitbreidt naar professionele scenario's zoals de digitalisering van gebouwen, BIM-modellering, het inmeten van binnenruimten en de digitalisering van industriële installaties, stellen gebruikers steeds hogere eisen aan de geometrische nauwkeurigheid van puntenwolksproducten.

Toch heeft de branche nog geen uniforme standaard voor de nauwkeurigheidsvalidatie van mobiel laserscannen vastgesteld, en transparante, betrouwbare en reproduceerbare evaluatiemethoden zijn nog altijd schaars.

Deze whitepaper past een systematische methode toe die is gebaseerd op landmeetkundige principes om de nauwkeurigheid te valideren van puntenwolken die zijn vastgelegd met het handheld mobiele laserscansysteem Lixel L3, en documenteert de volledige testprocedure en de resultaten.

Voor deze validatie zijn 7 stuks Lixel L3 apparaten gebruikt (zowel het 16-lijns- als het 32-lijnsmodel), waarmee in totaal 20 onafhankelijke scansets zijn uitgevoerd.

De analyse richt zich op de relatieve nauwkeurigheid van de puntenwolk en beoordeelt daarmee integraal de geometrische nauwkeurigheid van de scanresultaten van de Lixel L3.

2. Uitdagingen bij het valideren van de nauwkeurigheid van mobiel scannen

2.1 Waarom nauwkeurigheidsvalidatie complexer is voor mobiele scansystemen

Verschillende typen meetsystemen vragen om verschillende validatieparadigma's. Total stations worden doorgaans gevalideerd door directe metingen op bekende doelen en vergelijking van coördinaten; terrestrische laserscanners (TLS) kunnen worden beoordeeld door puntenwolkscoördinaten te extraheren bij targets of bekende punten. Deze validatiemethoden zijn relatief volwassen.

De nauwkeurigheid van een mobiel laserscansysteem wordt door meerdere factoren beïnvloed — sensormeting, SLAM-lokalisatie en -kartering, trajectoptimalisatie en omgevingsomstandigheden — waardoor de uiteindelijke nauwkeurigheid niet op basis van één enkele hardwarespecificatie kan worden beoordeeld. Tegelijkertijd schat SLAM het sensortraject op basis van continue waarnemingen en vereffent het dat traject als geheel via loop-closure detectie en globale optimalisatie van het gehele traject. De uiteindelijke puntcoördinaten worden gezamenlijk bepaald door het geoptimaliseerde traject, zodat geen enkel afzonderlijk punt direct kan worden herleid tot een oorspronkelijke meetpositie (pose).

Nauwkeurigheidsvalidatie van een mobiel laserscansysteem moet daarom de uiteindelijke output-puntenwolk als evaluatieobject nemen en de relatieve nauwkeurigheid en algehele geometrische consistentie daarvan systematisch beoordelen onder wisselende ruimtelijke omstandigheden en meetafstanden.

2.2 Onze aanpak

Wij hanteren een **methode voor validatie van de relatieve nauwkeurigheid**: de geometrische nauwkeurigheid van de scan wordt beoordeeld door de afstanden tussen bekende targets in de puntenwolk te vergelijken met referentiewaarden.

De belangrijkste voordelen van deze methode:

- Vereist geen GCP's; de methode valideert zelfstandig de scanprestaties van het apparaat en het algoritme
- Wordt niet beïnvloed door registratiefouten ten opzichte van een coördinatensysteem; de methode beoordeelt direct de geometrische afstanden in de puntenwolk
- Is consistent met vergelijkbare evaluatiemethoden in de branche, waardoor systemen eenvoudig onderling te vergelijken zijn

3. Validatiemethode

3.1 Overzicht van de methode

Deze nauwkeurigheidvalidatie maakt gebruik van de methode van relatieve nauwkeurigheid. De belangrijkste stappen zijn:

- 1 Referentiewaarden vastleggen:** plaats cirkelvormige, hoogreflecterende targets verspreid over het testgebied en meet de coördinaten van hun middelpunten in met een uiterst nauwkeurig total station om de referentiedataset op te bouwen.
- 2 Puntenwolken vastleggen:** 5 operators voerden met 7 Lixel L3-units herhaalde, onafhankelijke scans uit, wat 20 puntenwolkdatssets opleverde.
- 3 Targetmiddelpunten extraheren:** identificeer automatisch elk target in elke dataset en bereken de coördinaat van het middelpunt.
- 4 Afstanden vergelijken:** bereken de afstanden tussen de targets in de puntenwolk en vergelijk deze één voor één met de ware afstanden die met het total station zijn gemeten; dit levert voor elke afstand een afstandsfout op.
- 5 Statistische analyse:** voeg de meetresultaten van alle 20 scansets samen en analyseer de totale nauwkeurigheid.

3.2 Definities van de nauwkeurigheidsmaten

Maat	Definitie
P68 ($\approx 1\sigma$)	68% van de afstandsafwijkingen tussen puntparen is kleiner dan of gelijk aan deze waarde
P85	85% van de afstandsafwijkingen tussen puntparen is kleiner dan of gelijk aan deze waarde
P97	97% van de afstandsafwijkingen tussen puntparen is kleiner dan of gelijk aan deze waarde
Gemiddelde	Rekenkundig gemiddelde van alle afstandsafwijkingen tussen puntparen

Maat	Definitie
RMSE	Root mean square error (wortel van de gemiddelde kwadratische fout)

Deze whitepaper hanteert **P68 (het 68e percentiel, ongeveer 1σ)** als primaire nauwkeurigheidsmaat, in lijn met de gangbare praktijk in de branche.¹

3.3 Statistische basis

De wijze waarop resultaten van meerdere apparaten en meerdere scans worden samengevoegd, heeft directe invloed op de uiteindelijke waarden en moet daarom expliciet worden vermeld. Deze whitepaper hanteert een **gepoolde percentielbasis**:

Alle afstandsafwijkingen tussen puntparen van alle apparaten en alle scans worden gecombineerd tot één dataset, waarna de percentielen rechtstreeks uit die dataset worden bepaald. Dat wil zeggen: 1.524 vergelijkingsrecords van puntpaarafstanden uit 20 scansets → gepoold en gesorteerd → de waarde op de positie van het 68e percentiel.

Deze basis is consistent met vergelijkbare nauwkeurigheidsrapporten in de branche en is eenvoudig te interpreteren.

4. Testomstandigheden

4.1 Testlocatie

De test is uitgevoerd op een volledige verdieping van een kantoorgebouw. De onderstaande afbeelding toont een bovenaanzicht (projectie) van de puntenwolk van die verdieping, met alle targetposities gemarkeerd.

¹P68 is het 68e percentiel, wat betekent dat 68% van de gemeten afwijkingen kleiner dan of gelijk aan die waarde is. Wanneer de fouten met teken bij benadering normaal verdeeld zijn met een gemiddelde van nul, is P68 bij benadering gelijk aan 1σ (één standaardafwijking). Deze whitepaper gebruikt P68 overal als gemeten statistiek; de vergelijking met 1σ geldt alleen wanneer aan die voorwaarde is voldaan. Alle percentielen in deze whitepaper zijn berekend op de gepoolde percentielbasis zoals gedefinieerd in paragraaf 3.3 (puntpaarafwijkingen van alle scans worden gecombineerd tot één dataset voordat de percentielen worden bepaald), met één consistente basis zodat verschillende testresultaten met elkaar kunnen worden vergeleken.



Figuur 1: Bovenaanzicht van de puntenwolk van de testlocatie en verdeling van de targets (de 13 targets die in de evaluatie zijn meegenomen)

Toelichting bij figuur 1 (tekst in de afbeelding is niet vertaald)

Grijsstinten: bovenaanzicht van de puntenwolk van de testverdieping (gangen, ruimten en centraal trappenhuis).

• **Donkerrode stip** = targetmiddenpunt; het witte label ernaast toont het targetnummer.

Targetnummers per zone: bovenste gang 37, 40, 45, 65, 56 · onderste gang 20, 6, 2, 47, 50 · ruimten aan de bovenzijde 42, 43 (links) en 60 (rechts) — in totaal 13 targets.

Kenmerken van de testlocatie:

Onderdeel	Parameter
Vloeroppervlak	Ca. 507 m ²
Omvang van het targetnetwerk	24,5 m × 38,9 m
Ruimtelijke structuur	Lange gangen aan beide zijden + meerdere afzonderlijke ruimten + centraal trappenhuis
Verdiepingen	Eén verdieping (hoogteverschil targets < 5 cm)

Zoals de plattegrond laat zien, is de locatie geen eenvoudige open ruimte of een enkele gang, maar een samengestelde structuur van twee parallelle lange gangen, een korte verbindingsgang en meerdere afzonderlijke ruimten. De gangen zijn bijna 39 m lang; de ruimten moeten één voor één worden betreden en verlaten, wat leidt tot veelvuldige bochten en lussen.

Deze structuur stelt SLAM voor twee uitdagingen: lange gangen bieden onvoldoende geometrische beperking in dwarsrichting en zijn gevoelig voor opgebouwde drift in lengterichting; het veelvuldig in- en uitlopen van ruimten genereert een groot aantal loop-closurebeslissingen. In combinatie sluiten deze omstandigheden beter aan bij de praktijk van gebouwopnames en interieurrenovatieprojecten dan een open terrein of een korte gang.

4.2 Opstelling van de targets

- **Targettype:** cirkelvormige, hoogreflecterende targets, diameter 4 cm
- **Aantal targets:** 13 geplaatst, 13 meegenomen in de evaluatie
- **Verdeling:** langs beide zijden van de gangen en op de wanden van elke ruimte, verspreid over het volledige testgebied (zie figuur 1)
- **Afstandsbereik puntparen:** 5,4 m — 44,2 m (mediaan 20,2 m)
- **Gevormde puntparen:** 78 per set

De targets zijn op de wanden bevestigd en zijn gedurende de gehele test op hun positie gebleven.

Figuur 1 toont het verdelingspatroon van de targets: gelijkmatig verdeeld langs beide zijden van de twee lange gangen en doorlopend in elke afzonderlijke ruimte. Deze opstelling levert puntpaarafstanden op over het volledige bereik van 5,4—44,2 m, waarvan meer dan de helft boven 20 m ligt — inclusief zowel korte puntparen binnen één ruimte als lange puntparen die de gehele verdieping doorkruisen en alleen via meerdere bochten met elkaar verbonden zijn. Die laatste zijn het gevoeligst voor opgebouwde SLAM-fouten.

4.3 Referentiesysteem

De referentiecoördinaten zijn ingemeten met een uiterst nauwkeurig total station:

- **Instrument:** Leica TS60
- **Nauwkeurigheid na vereffening:** 1,5 mm
- **Methode:** meerdere series waarnemingen + netwerkvereffening

De nauwkeurigheid van het referentiesysteem is aanzienlijk beter dan de gespecificeerde nauwkeurigheid van het geteste systeem, waarmee wordt voldaan aan de basisvereiste voor een referentiestandaard bij meettechnische validatie.²

4.4 Scanconfiguratie

Onderdeel	Parameter
Getest systeem	Lixel L3 (16-120 × 4 units + 32-120 × 3 units)
Totaal aantal apparaten	7 units
Totaal aantal scansets	20 sets
Nabewerking	Standaardworkflow, geen GCP-optimalisatie
Uitlijning	Automatische uitlijning op hoogreflecterende targets

²De verhouding tussen de nauwkeurigheid van het referentiesysteem (ca. 1,5 mm) en de gespecificeerde nauwkeurigheid van het geteste systeem (5 mm) is ongeveer 1:3,3, waarmee wordt voldaan aan het voor dit project gehanteerde criterium dat de capaciteitsverhouding tussen referentie- en testsysteem niet kleiner mag zijn dan 3:1. Het referentiesysteem heeft zelf ook een eindige fout, zodat de waargenomen afwijkingen die bijdrage bevatten; de meetresultaten zijn daardoor relatief conservatief. Uitgaande van de aanname dat de fouten van het referentie- en het testsysteem onafhankelijk zijn en beide op 1σ zijn gekarakteriseerd, levert scheiding via de wortel uit de kwadratensom (root sum of squares) een foutbijdrage van het apparaat op van ongeveer $\sqrt{(4,2^2 - 1,5^2)} \approx 3,9$ mm (een voorwaardelijke schatting die alleen onder die aannames geldt). De direct waargenomen gecombineerde absolute afstandsafwijking tussen puntparen bij P68, die referentie- en testsysteem samen omvat, bedraagt 4,2 mm.

Alle nauwkeurigheidsgegevens zijn verkregen uit relatieve puntenwolken die zonder GCP-nabewerking zijn verwerkt, en weerspiegelen daarmee de pure prestaties van het apparaat en het algoritme.

5. Dataverwerking

5.1 Targetextractie

De coördinaten van de targetmiddelpunten zijn met een geautomatiseerd algoritme uit de puntenwolk geëxtraheerd:



Figuur 2: Punten geëxtraheerd van een cirkelvormig, hoogreflecterend target in de puntenwolk

Toelichting bij figuur 2 (de afbeelding bevat geen tekst)

Links: uitsnede van de puntenwolk rond één target: ■ **rood** = punten op het hoogreflecterende target; ■ **groen/cyaan** = overgangszone aan de rand van het target; ■ **blauw/paars** = omliggend wandoppervlak.

Rechts: uitsluitend de geëxtraheerde targetpunten (■ **overwegend rood**, met enkele ■ **gele/groene** randpunten).

- 1 Automatisch lokaliseren van cirkelvormige, hoogreflecterende targetgebieden op basis van intensiteitsinformatie
- 2 Bepalen van de coördinaten van het targetmiddelpunt met een in de branche gangbaar standaardalgoritme (fitting)
- 3 Handmatig controleren van de extractieresultaten om te bevestigen dat de positie van het middelpunt plausibel is

Slagingspercentage van de extractie:

Resultaat targetidentificatie	Scansets	Targets	Opmerkingen
Alle targets geëxtraheerd	17 sets	13	78 geldige puntparen per set in de evaluatie.
Gedeeltelijk mislukte extractie	3 sets	12	In elk van de 3 betreffende scans ontbrak 1 target, wat 66 geldige puntparen per set in de evaluatie opleverde.

Er zijn dertien targets meegenomen in de evaluatie, met 257 geslaagde extracties op een theoretisch maximum van 260 — een slagingspercentage van 98,8%.

Oorzaken van mislukte extractie: individuele targets met onvoldoende intensiteitscontrast, een lage punt dichtheid of een te korte zichtlijn.

5.2 Berekening van puntpaarafstanden

De in de evaluatie meegenomen targets zijn onderling gepaard. Voor elk paar is de afstand tussen de uit de puntenwolk geëxtraheerde coördinaten berekend, naast de bijbehorende ware afstand. De absolute waarde van het verschil is de afstandsafwijking voor dat paar.

5.3 Verdeling van puntpaarafstanden

De afstandssamenstelling voor één scanset (13 targets, 78 paren) is:

Afstandsklasse	Puntparen	Aandeel
5—10 m	11	14,1%
10—20 m	27	34,6%
≥20 m	40	51,3%
Totaal	78	100%

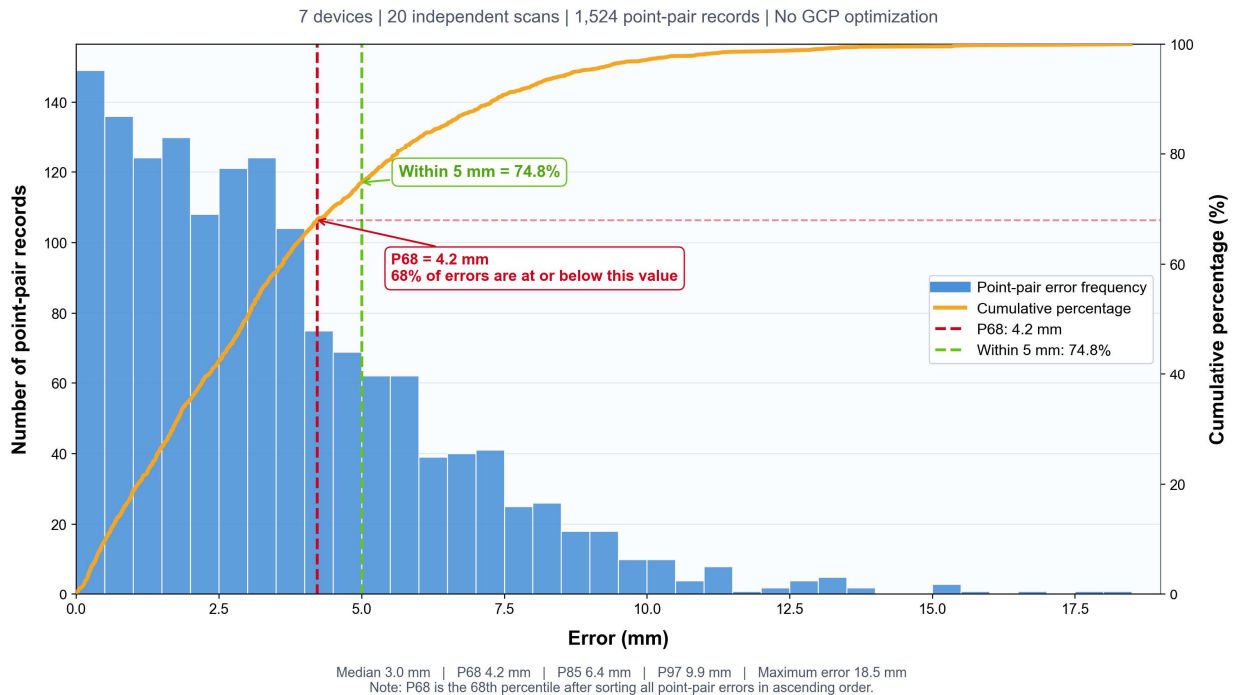
Gepoold over 20 scansets bevat de dataset 1.524 puntparen met afstanden van 5,40 tot 44,22 m en een mediaan van 20,23 m. Meer dan 50% van de puntparen ligt boven 20 m, waarmee het typische werkbereik van een handheld scanner volledig wordt afgedekt.

6. Resultaten

6.1 Verdeling van de afwijkingen

Het onderstaande diagram toont de verdeling van alle 1.524 afstandsafwijkingen tussen puntparen van 7 Lixel L3-units over 20 onafhankelijke scansets. De fouten zijn ingedeeld in klassen van 0,5 mm; de gele curve toont het cumulatieve percentage van de puntpaarfouten.

Lixel L3 Point-to-Point Distance Error Distribution



Figuur 3: Verdeling van de afstandsafwijkingen tussen puntparen van de Lixel L3 op een locatie van ca. 507 m² (7 apparaten, 20 scansets, geen GCP)

Toelichting bij figuur 3 — Nederlandse vertaling van de Engelse tekst in de grafiek

Titel: “Lixel L3 Point-to-Point Distance Error Distribution” = Verdeling van de afstandsfout tussen puntparen – Lixel L3

Subtitel: “7 devices | 20 independent scans | 1,524 point-pair records | No GCP optimization” = 7 apparaten | 20 onafhankelijke scans | 1.524 puntpaarrecords | geen GCP-optimalisatie

Assen: “Number of point-pair records” (links) = aantal puntpaarrecords · “Cumulative percentage (%)” (rechts) = cumulatief percentage (%) · “Error (mm)” (horizontaal) = fout (mm)

■ **Blauwe staven** — “Point-pair error frequency” = frequentie van puntpaarfouten (klassen van 0,5 mm)

— **Oranje/gele curve** — “Cumulative percentage” = cumulatief percentage (rechteras)

- - **Rode stippellijn en rood kader** — “P68: 4.2 mm” = P68: 4,2 mm; “P68 = 4.2 mm – 68% of errors are at or below this value” = P68 = 4,2 mm – 68% van de fouten is kleiner dan of gelijk aan deze waarde. De lichtrode horizontale stippellijn markeert het niveau van 68% op de cumulatieve curve.

- - **Groene stippellijn en groen kader** — “Within 5 mm: 74.8%” = binnen 5 mm: 74,8%

Onderschrift: “Median 3.0 mm | P68 4.2 mm | P85 6.4 mm | P97 9.9 mm | Maximum error 18.5 mm” = mediaan 3,0 mm | P68 4,2 mm | P85 6,4 mm | P97 9,9 mm | maximale fout 18,5 mm

Noot: “Note: P68 is the 68th percentile after sorting all point-pair errors in ascending order.” = Opmerking: P68 is het 68e percentiel na sortering van alle puntpaarfouten in oplopende volgorde.

De rode stippellijn markeert de positie van P68 = 4,2 mm, wat betekent dat 68% van de afstandsafwijkingen tussen puntparen kleiner dan of gelijk aan die waarde is. De groene stippellijn markeert de gespecificeerde nauwkeurigheid van 5 mm.

6.2 Samenvatting van de nauwkeurigheidsmaten

Op basis van de gepoolde percentielbasis zoals beschreven in paragraaf 3.3 zijn de statistieken voor alle 1.524 afstandsafwijkingen tussen puntparen als volgt:

Percentiel	Afwijking
P50 (mediaan)	3,0 mm

Percentiel	Afwijking
P68 ($\approx 1\sigma$, primaire maat)	4,2 mm
P85	6,4 mm
P97	9,9 mm
Gemiddelde	3,5 mm

7. Conclusie

• Belangrijkste conclusie

Voor deze test zijn 7 Lixel L3-units ingezet op een locatie van ca. 507 m², met typische samengestelde binnenscenario's zoals lange gangen, meerdere afzonderlijke ruimten en veelvuldige loop closures. De resultaten laten zien dat voor de gepoolde steekproef de absolute afstandsafwijking tussen puntparen bij **P68 4,2 mm** bedraagt, beter dan de gespecificeerde 5 mm @ 1 σ (typisch).³

³De gespecificeerde nauwkeurigheid van ≤ 5 mm @ 1 σ is de verwachte prestatie onder typische werkomstandigheden. De werkelijke nauwkeurigheid wordt beïnvloed door de geometrie van de locatie, de planning van het scanpad en de omgevingsomstandigheden, en afwijkingen kunnen in afzonderlijke veeleisende scenario's enigszins variëren. De gegevens in deze whitepaper zijn verkregen onder de specifieke testomstandigheden zoals beschreven in hoofdstuk 4.

Bijlage

A. Terminologie

Term	Definitie
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping (gelijktijdige lokalisatie en kartering)
GCP	Ground Control Point (grondcontrolepunt / paspunt)
P68 / 1σ	Wanneer de fouten met teken bij benadering normaal verdeeld zijn met een gemiddelde van nul, is P68 bij benadering gelijk aan 1σ (één standaardafwijking)
RMSE	Root Mean Square Error (wortel van de gemiddelde kwadratische fout)
TLS	Terrestrial Laser Scanner (terrestrische laserscanner)

B. Lijst van testapparatuur

Onderdeel	Specificatie
Getest systeem	Lixel L3 16-120 × 4 units + Lixel L3 32-120 × 3 units
Referentie-instrument	Uiterst nauwkeurig total station (nauwkeurigheid na vereffening 1,5 mm)
Targets	Cirkelvormige, hoogreflecterende targets × 13
Verwerkingssoftware	Lixel Studio versie 4.1

Lixel L3 · Versie 1.0 · september 2026 · © 2026 XGRIDS. Alle rechten voorbehouden.

Nederlandse vertaling van de Engelse originele versie (versie 1.0, september 2026). In geval van twijfel is de Engelse versie leidend.