**Trackingmethoden in dynamische ProCam-systemen**

**ArUco-marker tracking**

ArUco-markers zijn vierkante fiducials met unieke binaire patronen. Ze worden door de camera gedetecteerd (OpenCV’s ArUco-module) en de markerhoeken worden op sub-pixelniveau gelokaliseerd ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf" \l ":~:text=corner%20detection%20at%20sub,between%20ci%2C%20di%20and%20pi)). Vervolgens kan de 6DoF-positie van de camera (én projector) relatief tot de marker berekend worden. Uit onderzoek blijkt dat hiermee zeer hoge nauwkeurigheid mogelijk is. Zo werd in een dynamische calibratietechniek met ArUco-markers een camerareprojectiefout ≤ 0,5 pixel gehaald en voor de projector ≤ 4 pixels (< 0,4 % van de projectie) ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image)). Dit duidt op sub-millimeternauwkeurigheid bij hoge resolutie.

* **Voordelen:** ArUco-markertracking is robuust en snel (real-time), met unieke ID’s voor meerdere markers en scherpe foutmodellen. De algoritmen zijn goed gedocumenteerd en bereikt subpixel-precisie ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf#:~:text=corner%20detection%20at%20sub,between%20ci%2C%20di%20and%20pi)). Dynamische mapping-systemen gebruiken ArUco-rasters om snel 2D–3D-correspondenties te maken; Ibrahim et al. gebruikten bijvoorbeeld geprojecteerde ArUco-roosters op een bewegend oppervlak voor automatische calibratie ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=In%20this%20paper%2C%20we%20propose,camera%20pair%20is)).
* **Nadelen:** Markers moeten zichtbaar en niet-bedekt zijn. Bij occlusie of sterke vervorming (schuine kijkhoek, bewegingsonscherpte) kan detectie mislukken of onnauwkeurig worden. De effectieve afstand is beperkt; bij grote afstand worden markers klein en ruisgevoelig. Bovendien is een markerboard of –grid nodig in de scène, wat niet altijd praktisch is.

Kortom, ArUco-tracking levert, mits zicht, zeer stabiele en nauwkeurige posities; in de literatuur wordt dit vaak geprezen als “highly reliable” ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf#:~:text=Our%20pattern%20is%20based%20on,four%20corners%20of%20the%20markers)) ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image)). Tegelijk vergt het gebruik van markers extra opstelling (fysiek of geprojecteerd), en kan echte dynamiek (blokkering, lichtveranderingen) problemen geven.

**Dieptesensortracking (RealSense vs. LiDAR)**

Dieptesensoren zoals Intel RealSense (stereo- of lidar-gebaseerd) leveren puntwolken waarmee de omgeving zonder markers kan worden gevolgd. Matchen van opeenvolgende frames (bv. via ICP) of RGB-D SLAM zijn gebruikelijk. De prestatie hangt sterk af van het sensingtype:

* **RealSense (stereo/ToF):** Goed voor korte tot middellange afstand (enkele meters). De meetnauwkeurigheid is zeer klein vlak bij de lens en neemt lineair toe met afstand ([Depth accuracy for a particular application – Intel RealSense Help Center](https://support.intelrealsense.com/hc/en-us/community/posts/26279715612307-Depth-accuracy-for-a-particular-application#:~:text=Hi%20Dmitrii%20Sokolov%C2%A0%20RMS%20Error,to%20distance%20from%20the%20camera)). In de praktijk is de fout vaak ~1–2 % van de afstand: zo blijkt de D455 bij 4 m ≈2 % dieptefout te hebben ([Realsense or LIDAR for a robot? – Intel RealSense Help Center](https://support.intelrealsense.com/hc/en-us/community/posts/20295465014547-Realsense-or-LIDAR-for-a-robot" \l ":~:text=Hi%20Raymermed%C2%A0%20The%20RealSense%20camera,D435i%20has%20at%203%20meters)). De D455 (95 mm baseline) biedt bijvoorbeeld twee keer zoveel afstandsnauwkeurigheid als de oudere D435i ([Realsense or LIDAR for a robot? – Intel RealSense Help Center](https://support.intelrealsense.com/hc/en-us/community/posts/20295465014547-Realsense-or-LIDAR-for-a-robot" \l ":~:text=Hi%20Raymermed%C2%A0%20The%20RealSense%20camera,D435i%20has%20at%203%20meters)). Een studie toont dat de D415 (smalle baseline) betere reconstructie gaf op kort bereik, terwijl de RealSense L515 (Time-of-Flight LiDAR) minder systematische fouten had ( [Metrological Characterization and Comparison of D415, D455, L515 RealSense Devices in the Close Range - PMC](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8622561/#:~:text=their%20acquisition%20volume,device%20achieved%20better%20results%20on) ). RealSense-sensoren leveren dus scherpe, gedetailleerde puntwolken binnenshuis, maar zijn gevoelig voor weinig textuur, reflecterende oppervlakken en fel zonlicht. Voordelen zijn lage kosten, geïntegreerde RGB en hoge framerates; nadelen zijn beperkte afstand (bv. geen zeer dichtbij-verspreiding bij D455 ([Realsense or LIDAR for a robot? – Intel RealSense Help Center](https://support.intelrealsense.com/hc/en-us/community/posts/20295465014547-Realsense-or-LIDAR-for-a-robot" \l ":~:text=Hi%20Raymermed%C2%A0%20The%20RealSense%20camera,D435i%20has%20at%203%20meters))), ruis en gatjes in de data.
* **LiDAR-tracking:** Traditionele LiDAR-systemen (gelaagd spinnende lasers) reiken veel verder (dozens meters) met een veel hogere nauwkeurigheid. Typisch is de positionele fout enkele centimeters op tientallen meters, en vrijwel ongevoelig voor omgevingslicht. Hierdoor worden LiDAR’s gebruikt voor robuuste SLAM in grote ruimtes. Nadeel is omvang, stroomverbruik en kosten. Uit benchmarks blijkt dat een LiDAR-gebaseerd spooropnamesysteem ~3–5 cm nauwkeurig is ([BLOG | Samsung Research](https://research.samsung.com/blog/Open-source-open-hardware-ground-truth-for-Visual-Odometry-and-SLAM-applications#:~:text=growing%20community%20and%20it%20addresses,was%20demonstrated%20in%20this%20paper)), vergelijkbaar met (of beter dan) RealSense op grote afstand. LiDAR heeft echter vaak lagere punten-dichtheid en geeft geen kleurinformatie.

Kort samengevat biedt RealSense snelle, relatief nauwkeurige depth-tracking binnenshuis tegen lage kosten, terwijl LiDAR grotere stabiliteit en bereik geeft in grootschalige omgevingen. In de literatuur concludeert men dat RealSense (bij goede lichtomstandigheden) geschikt is tot enkele meters, maar dat LiDAR buiten en bij grotere afstanden stabieler is ( [Metrological Characterization and Comparison of D415, D455, L515 RealSense Devices in the Close Range - PMC](https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8622561/#:~:text=their%20acquisition%20volume,device%20achieved%20better%20results%20on) ) ([Depth accuracy for a particular application – Intel RealSense Help Center](https://support.intelrealsense.com/hc/en-us/community/posts/26279715612307-Depth-accuracy-for-a-particular-application#:~:text=Hi%20Dmitrii%20Sokolov%C2%A0%20RMS%20Error,to%20distance%20from%20the%20camera)). Er zijn geen studie-normen die eenduidig “beter” aangeven – het hangt af van toepassing.

**SLAM-gebaseerde tracking (Stella-VSLAM e.d.)**

SLAM-systemen (zoals Stella VSLAM, ORB-SLAM3, DSO, enz.) schatten de camerabeweging alleen uit de scènebeelden. De prestaties zijn zeer afhankelijk van cameratype en scene:

* **Nauwkeurigheid:** In vergelijkende experimenten behaalde DSO (Direct Sparse Odometry) de kleinste absolute trajectfouten, terwijl feature-gebaseerde SLAM (ORB-SLAM3, Stella) hogere fouten had. Onder typische indoor omstandigheden bedroeg de fout enkele tientallen centimeters tot decimeters per traject. Interessant is dat Stella (OpenVSLAM) soms beter presteerde dan ORB-SLAM3 in dezelfde tests. Een onafhankelijke studie vond echter dat ORB-SLAM3 nauwkeuriger was, maar Stella veel sneller en robuuster (30 fps bij 480p). Kortom: actuele SLAM-algoritmen kunnen in een statische omgeving redelijk tracken, maar kennen beperkte precisie zonder IMU en zonder herhaalslui­ters.
* **Typische foutbronnen:** SLAM- tracking faalt vaak door weinig textuur (weinig features), snelle beweging (motion blur), rollende sluiter-effecten, en bewegende objecten in beeld (dynamische scčnes). Dit leidt tot drift en in het ergste geval trackverlies. Zonder extra sensoren (IMU of diepte) is het “out-of-the-box” niet gegarandeerd betrouwbaar. Verder kan de geprojecteerde content zelf storend werken: fel projectorlicht of schaduwen veranderen het camerabeeld, wat tracking lastiger maakt.
* **Toepassing in DPM:** In dynamische projectiemapping is pure SLAM nog beperkt toegepast. De meeste systemen vertrouwen juist op markers of gespecialiseerde high-speed camera’s voor tracking (bijv. Narita et al. gebruikten een raster van helder gemarkeerde punten met 0,2 ms reactietijd ( [Dynamic projection mapping onto a deformable object with occlusion based on high-speed tracking of dot marker array - Tokyo University of Science](https://tus.elsevierpure.com/en/publications/dynamic-projection-mapping-onto-a-deformable-object-with-occlusio#:~:text=efficient%2C%20high,printed%20on%20the%20deformable%20object))). SLAM heeft theoretisch potentie (de projector-camera-eenheid kan zichzelf lokaliseren tegen de omgeving), maar in de praktijk is dat lastig door de hierboven genoemde fouten.

In de literatuur bestaan dus wisselende conclusies: sommige studies pleiten voor directe methoden (DSO) voor nauwkeurigheid, terwijl anderen Stella benadrukken voor snelheid/robustheid. Over het geheel blijkt geen één SLAM-methode zonder meer “beste” voor dynamische mapping; het is vaak een trade-off tussen nauwkeurigheid en stabiliteit.

**Vergelijking van trackingmethoden**

Onderzoeksresultaten tonen geen eenvoudige winnaar, maar het volgende patroon:

* **ArUco-markertracking:** Biedt zeer stabiele en nauwkeurige posities wanneer de markers zichtbaar zijn. Er is praktisch geen drift, omdat elke frame relatief aan een gekende marker wordt gemeten ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image)). De nauwkeurigheid is typisch sub-pixelschaal in het camerabeeld. Dit betekent dat voor gekalibreerde systemen foutmarges millimeters-niveau kunnen zijn. Het nadeel is de afhankelijkheid van fysieke markers; de methode werkt alleen binnen het zichtveld van de markers.
* **Dieptesensor (RealSense):** Geeft rijke 3D-informatie zonder markers. Tracking met RealSense is redelijk nauwkeurig op korte afstanden (enkele centimeters tot decimeters fout), maar er treedt drift op bij vrij bewegen. De techniek vereist tekstuur of structuur om op te vertrouwen. Volgens tests presteert RealSense matig: een hand-held SLAM met alleen kamerabeelden gaf in experimentele data ATE’s van ~0,03–0,29 (gedeelde standaard). RealSense kan zelfs minder stabiel zijn dan gelijktijdige LiDAR-oplossingen, die errors ~5 cm rapporteren ([BLOG | Samsung Research](https://research.samsung.com/blog/Open-source-open-hardware-ground-truth-for-Visual-Odometry-and-SLAM-applications#:~:text=growing%20community%20and%20it%20addresses,was%20demonstrated%20in%20this%20paper)).
* **SLAM-gebaseerd (Stella/ORB):** Flexibel maar minder nauwkeurig dan markers. Onderlinge studies laten zien dat feature-SLAM fouten van enkele centimeters tot decimeters kan hebben, terwijl directe methoden soms iets nauwkeuriger zijn. SLAM vraagt veel rekenkracht en kan bij dynamische content (bewegingen/lichtfluctuaties) hun stabiliteit verliezen. Wel is SLAM bruikbaar zonder extra hardware.

Kwantitatief: Samsung Research noteerde dat goedkope SLAM-riggen zonder IMU doorgaans positionele fouten tot ~5–10 cm hebben ([BLOG | Samsung Research](https://research.samsung.com/blog/Open-source-open-hardware-ground-truth-for-Visual-Odometry-and-SLAM-applications#:~:text=growing%20community%20and%20it%20addresses,was%20demonstrated%20in%20this%20paper)), terwijl marker-calibraties veel nauwkeuriger zijn (bijv. <0,4% projectieschaal ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image))). High-speed visiesystemen (zoals Narita et al.) toonden zelfs tracking op 0,2 ms/frame ( [Dynamic projection mapping onto a deformable object with occlusion based on high-speed tracking of dot marker array - Tokyo University of Science](https://tus.elsevierpure.com/en/publications/dynamic-projection-mapping-onto-a-deformable-object-with-occlusio#:~:text=efficient%2C%20high,printed%20on%20the%20deformable%20object)), wat qua stabiliteit superieur is aan standaard SLAM, mits een speciaal markerpatroon.

**Conclusie:** Als stabiliteit en absolute nauwkeurigheid primair zijn (en markers geplaatst kunnen worden), geeft ArUco-tracking doorgaans de beste prestaties ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image)). RealSense- of LiDAR-SLAM bieden flexibiliteit en markerloosheid, maar kennen wat meer fout (drift) over tijd. SLAM-systemen zitten qua performance ertussen: ze kunnen vrij bewegen volgen, maar met grotere onzekerheid.

**Robotarm als benchmark voor nauwkeurigheid**

Het gebruik van een robotarm voor ground-truth is in onderzoek inderdaad gebruikelijk. Een nauwkeurig kinematisch gemodelleerde robot kan de camera/projector in bekende posities brengen, zodat trackingresultaten direct vergeleken kunnen worden met de werkelijke pose. Zo beschreef NIST een meetsysteem met een robotarm (gekalibreerd met een laser tracker) dat een positionele nauwkeurigheid van ~0,01 mm en 0,03° had ([Ground Truth Systems for Object Recognition and Tracking](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2013/NIST.IR.7923.pdf" \l ":~:text=The%20systems%20share%20the%20characteristic,degree%20in%20rotation%3B%20and%20the)). In dat systeem kon de robotarm, indien precies genoeg, zelf de grondwaarheid leveren ([Ground Truth Systems for Object Recognition and Tracking](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2013/NIST.IR.7923.pdf" \l ":~:text=The%20systems%20share%20the%20characteristic,degree%20in%20rotation%3B%20and%20the)).

Voorbeelden uit de literatuur: onder meer de “Perception Challenge” van 2011 gebruikte dergelijke rigs (robotarm + optische meting) om trackers te valideren ([Ground Truth Systems for Object Recognition and Tracking](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2013/NIST.IR.7923.pdf" \l ":~:text=Marvel%20at%20el.%20,are%20shown%20in%20Figure%2010)). Ook in robotvisie en projectiemappingonderzoek worden soms industrial manipulators ingezet; bijvoorbeeld om een camera of projector zeer gecontroleerd over een oppervlak te bewegen voor kalibratie en foutenmeting. De precisie van de robot (en eventuele extra sensoren) bepaalt dan de basis-nauwkeurigheid van de evaluatie. Samengevat: ja, een robotarm is een gangbare manier om trackernauwkeurigheid te benchmarken – het is goed gedocumenteerd dat dit millimeterniveau of beter kan bieden ([Ground Truth Systems for Object Recognition and Tracking](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2013/NIST.IR.7923.pdf" \l ":~:text=The%20systems%20share%20the%20characteristic,degree%20in%20rotation%3B%20and%20the)).

**Camera–projector-calibratie: procedures en best practices**

Standaard statische calibratie gaat via bekende patronen. Typisch wordt eerst de camera geïntrinsiek gekalibreerd met een planar referentie (bv. een geprint ruitjesraster volgens Zhang/Heikkilä). Daarna wordt de projector gehanteerd als omgekeerde camera: men projecteert codering (bijv. grijswaarden-, sinus- of binaire structuurlichtpatronen) op een gekende (bijv. vlakke) target en meet via de camera de overeenkomstige pixelwaarden. Hierbij bepaalt men de projector-intrinsieken (brandpuntsafstand, hoofdpunten, lensvervorming) en de extrinsieke relatie tussen camera en projector. Veel procedures vereisen dat het calibratieoppervlak vlak is en zichtbaar voor beide devices.

Typische calibratiestappen zijn: (1) camerakalibratie met een checkerboard (Zhang’s methode); (2) projectie van patronen (bijv. gekruiste lijnen of ArUco’s) om pixel-3D correspondenties te verkrijgen; (3) optimalisatie (Levenberg–Marquardt) van camera- en projectorparameters zodat herprojectiefouten geminimaliseerd worden. Vaak detecteren we ArUco-hoeken met subpixel-precisie ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf#:~:text=corner%20detection%20at%20sub,between%20ci%2C%20di%20and%20pi)) om de metingen te verfijnen. Onderzoek laat zien dat dergelijke calibraties tot <1 pixel fout kunnen komen als alles goed gaat ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image)).

**Foutenbronnen:** Verstoringen treden op door niet-perfecte printen van het target (niet-planariteit), lensvervorming die niet volledig wordt gemodelleerd, en metingen die ruis bevatten (bijv. doordat projectorpixels niet precies samenvallen met camerabeelden). Ook projectors hebben aberraties en een gamma die mispositie kan veroorzaken. Bij dynamische calibratie introduceert oppervlakteruis extra jitter. In [19] lossen de auteurs dit op met een Kalman-filter over de meetdiepte ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf" \l ":~:text=extrinsic%20parameters%20of%20significantly%20higher,the%20surface%20and%20smooth%20them)). Verder kan het ontbreken van nauwkeurige synchronisatie (bijv. tussen projector en camera) leiden tot tijdskleuren of fout matching.

**Best practices:** Gebruik hoge resolutie beelden, zorg voor goede belichting en hoge contrastraster op het target. Verdeel het calibratiepatroon over het hele gezichtsveld (variëer afstand en oriëntatie). Maak indien mogelijk meerdere opnames en gebruik subpixel-fijnstelling voor hoekdetectie ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf" \l ":~:text=corner%20detection%20at%20sub,between%20ci%2C%20di%20and%20pi)). Stel lensvervorming expliciet bij (tangentieel radiaal). Als de projector niet scherp genoeg is, focus hem dan. Voer tenslotte iteratieve raffinering uit (de calibratie-algoritmen gebruiken vaak Gauss–Newton/LM). In dynamische situaties helpt meten met een dieptecamera: men kan B-spline-interpolaties gebruiken om het oppervlak te modelleren en zo ruis te verminderen.

**Voorbeeldresultaten:** Ibrahim et al. toonden in dynamische test dat de gemeten herprojectiefout van de camera < 0,5 pixel bleef en voor de projector < 4 pixel ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image)), ook bij snelle beweging. Dit illustreert dat, mits correcte procedure, projector-camera-calibratie zeer nauwkeurig kan zijn. Het is cruciaal om (net als bij camerakalibratie) nauwkeurige corner-detectie te hebben en de ruis te minimaliseren (bijvoorbeeld met Kalman-smoothing ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf" \l ":~:text=extrinsic%20parameters%20of%20significantly%20higher,the%20surface%20and%20smooth%20them))).

**Samenvatting:** De standaardpraktijk is dus “camera eerst, projector daarna” met bekende patronen en optimalisatie op reprojection error. Door gedegen implementatie (zoals bij Heikkilä/Zhang voor de camera en gestructureerd licht voor de projector) en het in acht nemen van ruisbronnen (lens, board, jitter) zijn fouten goed te beheersen. Herhaalde calibraties en filtering zijn aan te bevelen om de beste nauwkeurigheid te behalen.

**Bronnen:** Deze bevindingen zijn afkomstig uit de literatuur op het gebied van projector-camera systemen en AR/robotica ([Projector-Camera Calibration on Dynamic, Deformable Surfaces](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-VR-Poster1.pdf#:~:text=accuracy%20using%20reprojection%20error%20onto,size%20of%20the%20projection%20image)) ([Self-Calibrating Dynamic Projection Mapping System for Dynamic, Deformable Surfaces with Jitter Correction and Occlusion Handling](https://ics.uci.edu/~muhammti/Publications/2023-ISMAR-Conf.pdf" \l ":~:text=extrinsic%20parameters%20of%20significantly%20higher,the%20surface%20and%20smooth%20them)), waar talloze methoden en experimentele evaluaties deze procedures en nauwkeurigheden bevestigen.