

# Eine „2D/3D-Totalstation“ ohne Teilkreis

zur Vermessung, zur massenhaften Punktaufnahme, Dokumentation und Visualisierung

**Beschreibung der Hardware und der Funktionalitäten der Software  
Darstellung resultierender neuer Möglichkeiten  
für die Praxis in Vermessung und Objektaufnahme mit Beispielen**

## 1. Vorbemerkung

Eine moderne Digitalkamera – eine **2D-Kamera** - nimmt ein Bild auf, das die „Farbigkeit“ der Umwelt und die Lage der Objektpunkte in Form einer Zentralperspektive wiedergibt. Analog hierzu erfasst eine **3D-Kamera** (eine PMD-Kamera) die Geometrie der Umwelt in ihrer vollen Dreidimensionalität als Punktwolke mit einem einzigen „Klick“. Der hier durchgängig benutzte Begriff PMD-Kamera beschreibt einen Gerätetyp, der oft auch als ToF-Kamera (Time of Flight), RIM-Kamera (Range Imaging), 3D-Kamera oder 3D-PMD-Kamera bezeichnet wird. Dabei ist jedes einzelne Pixel des Empfangschips ein eigener miniaturisierter elektronischer Distanzmesser (PMD = Photo-Misch-Detektor).

Aus den **Positionen** des Pixels auf dem Empfangschip der 3D-Kamera werden (wie in der Photogrammetrie für 2D-Kameras) zwei Richtungen berechnet. Sie beschreiben zusammen mit der **Distanz** die Raumlage des Objektpunktes in Form von Polarkoordinaten im lokalen Kamera-Koordinatensystem. Verglichen mit 2D-Kameras ist die Pixelauflösung von 3D-Kameras noch gering: Mit  $204 * 204$  Pixeln - also etwa 41 k - weist die hier eingesetzte PMD-Kamera CamCube 2.0 der Firma PMD-Technologies die höchste derzeit kommerziell erhältliche Auflösung eines PMD-Chips auf. Geplant sind aber bereits 3D-Kameras mit einer Auflösung von  $512 \times 480$  Pixel.

## 2. Die Hardware-Komponenten der 2D/3D-Totalstation

Die 3D-Kamera und die 2D-Kamera sind starr miteinander kombiniert; die optischen Achsen verlaufen zueinander parallel. Die gesamte Kamerainheit ist in einer Montierung so befestigt, dass sie zur Aufnahme in beliebige Raumrichtungen gedreht werden kann.



Abb. 1 Kombination von 2D- und3D-Kamera

### 2.1. Funktion der 3D-PMD-Kamera CamCube 2.0 der Firma PMD Technologies Siegen

Für die  $204 \times 204$  distanzmessenden Pixel (41616 Pixel insgesamt) werden die Entfernungen zeitgleich ermittelt, basierend auf dem Phasenvergleichsverfahren. Eine großflächige Sendeeinheit, bestehend aus jeweils 42 Leuchtdioden beidseitig der Empfangsoptik, emittiert auf der Trägerwellenlänge 870 nm (Infrarot) ein amplitudenmoduliertes rechteckförmiges Signal mit einer Modulationsfrequenz von 20 MHz entsprechend einem Maßstab von 7,5 m. Nach Reflexion am Objekt gelangt es über das Linsensystem auf

das distanzmessende Pixel-Array. Jedes PMD-Pixel besitzt einen lichtempfindlichen Bereich; die Anzahl der dort freigesetzten Elektronen hängt von der Lichtstärke und Phasenlage des reflektierten Messsignals ab. Während einer wählbaren Integrationszeit werden die Elektronen in den Speicherkapazitäten gesammelt und die resultierenden Ladungszustände gespeichert. Aus diesen werden für jedes PMD-Pixel die **Entfernung**, die **Signalamplitude a** und die Intensität **b** (der **Grauwert**) berechnet.

## 2.2 Die 2D-Kamera und die periphere Sensorik

Die farbbegebende 2D-Kamera der Firma Basler mit einer Auflösung von 5 Megapixel weist eine maximale Bildrate von 17fps auf. Sie liefert die RGB-Werte zur Einfeldung der 3D-Punktwolken; ihr Bild dient zudem der Verbesserung der 3D-Punktlichte. Die Aufnahmezeitpunkte beider Kameras werden über elektrische Signale synchronisiert, die eine eigens gefertigte Triggerbox – Hardwaretrigger - erzeugt. Die Temperaturüberwachung geschieht über zwei Sensoren; ein zentrales Notebook steuert Datenerfassung und Datenspeicherung.

## 2.3 Die Montierung, Schlüssel zum neuartigen Konzept einer Totalstation

Die Kombination aus 2D/3D-Kamera ist in einer zweiachsigen Montierung ähnlich wie das Fernrohr eines Tachymeters oder Theodolits gelagert. Die Stelle der optischen Achse des Tachymeters nimmt nun die optische Achse der 2D-Kamera ein. Sie ist parallaxenfrei montiert, d. h. die Eintrittspupille des Objektivs (Nodalpunkt) liegt im Schnittpunkt von Kipp- und Stehachse. 2D-Kamera und 3D-Kamera sind in einem um die Kippachse verschwenkbaren Rahmen befestigt, der wiederum wie bei einem Tachymeter um die vertikale Stehachse drehbar ist. Abb. 2 zeigt den Prototyp der 2D/3D-Totalstation.

Die peripheren Bedienelemente sind bei dem Versuchsgerät manuell bedienbar. Es sind Grob- und Feinklemmen zur horizontalen und vertikalen Verschwenkung der montierten Einheit sowie diverse Libellen zur Grob- und Feinhorizontierung von Steh- und Kippachse und als Index zur Horizontierung der Aufnahmeichtung. Für Justierzwecke kann der Rahmen mit den Kameras um je 200 gon vertikal sowie horizontal - wie bei Theodolit oder Tachymeter üblich - in eine zweite Lage gebracht werden..

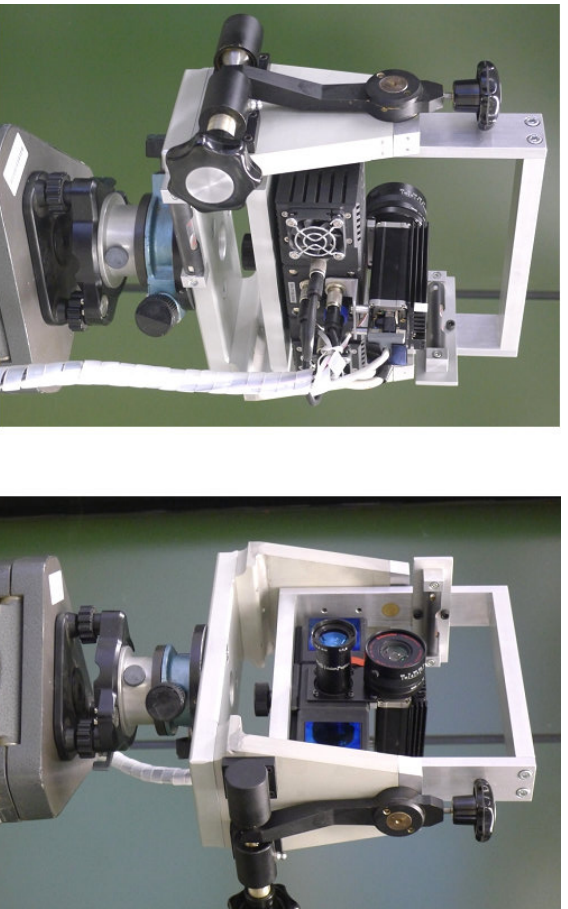


Abb. 2 Prototyp der 2D/3D-Kamera-Totalstation

### 3. Verfahren zum Betrieb der 2D/3D-Totalstation

Die Besonderheit einer PMD-Kamera, eine große Anzahl von Koordinaten mit einer einzigen Aufnahme zu erzeugen und die zusätzliche Möglichkeit der schnellen Aufnahmefolge (>10 fps) sowie die Kombination mit der 2D-Kamera und insbesondere die Art der Montierung schufen die Voraussetzung, spezielle neue Messmethoden zu entwickeln.

Das System wird wie eine Totalstation ortsfest auf einem Stativ fixiert. Analog den polaren Primärdaten einer tachymetrischen Messung mit einer herkömmlichen Totalstation – Horizontalrichtung, Zenitwinkel und Strecke – liefert der CanCube jedoch pro Momentaufnahme mehr als 41000 Polarkoordinaten innerhalb des Blickfeldes (Raumwinkel ca. 40 gon) und die 2D-Kamera erfasst das zugehörige Bild. Fügt man größere Bereiche nach Drehung um eine der Achsen überlappend aneinander, so lässt sich nach unterschiedlichen Verfahren der Winkel bestimmen, der bei der Drehung eines Tachymeters aus der Teilkreisablesung resultiert. Die „2D/3D-Totalstation“ benötigt jedoch **keine** Teilkreise. Der Betrag der Drehung wird hier über verschiedene redundante Verfahren bestimmt. Unterschiedliche Methoden sind zur Realisierung der teilkreisfreien Winkel- bzw. Richtungsbestimmung zwingend erforderlich. Sie werden durch die Kombination der Kameras und die Art der Montierung möglich und sind im Folgenden dargestellt.

#### 3.1. Richtungsbestimmung über sphärische Panoramen

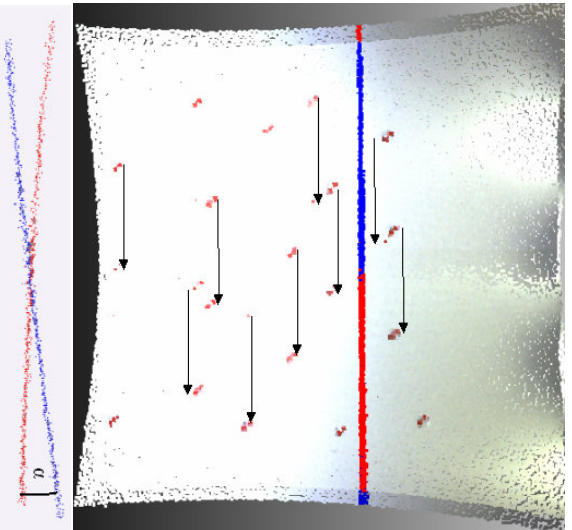
Die Panoramen werden ausschließlich aus Bildern der im Vergleich zur **3D**-Kamera höher auflösenden **2D**-Kamera erstellt. Die bekannte Methode der Herstellung eines Panoramas funktioniert um so besser, je mehr differenzierte und verschiedenfarbige Texturen die sich überlappenden Fotos enthalten. Die Überlappungsbereiche dienen der Registrierung (= Stitching), also der Minimierung der Lateralunterschiede der Pixel, die denselben Objektpunkten zuzuordnen sind. Häufig sieht man Panoramen aus Bildfolgen, die mit einer Kamera aufgenommen sind, deren optische Achse horizontal verläuft und die von Bild zu Bild um eine vertikale Drehungsachse durch die Eintrittspupille des Objektivs (Stehachse) verschwenkt wird. Ist das Panorama berechnet, so können den Bildpunkten die Strecken aus der gleichzeitigen Messung mit der **3D**-PMD-Kamera hinterlegt werden. Ein Klick ins Panorama liefert dann **unmittelbar** die zum jeweiligen Bildpunkt gehörige dreidimensionale polare Objektkoordinate.

Bezüglich der vertikalen Verschwenkung reichen feste Zenitwinkleinstellungen aus (z. Zt. durch schräg montierte Röhrenlibellen realisiert). Die Überlappung kann so auf ein Minimum beschränkt werden. Die hiesige 2D-Kamera erreicht eine Winkelauflösung von 0,02 gon entsprechend 3mm Querauwei­chung bei 10m Entfernung. - Nun könnte man meinen, eine Kamera und ein Laseristanz­messer anstelle des 2D/3D-Systems ergäben bereits eine teilkreislose Totalstation als preisgünstiges „bildbasiertes Tachymeter“ mit per se integrierter Dokumentation der Aufnahmesituation. Fotos alleine reichen jedoch nicht zum sicheren Stitching: mindestens ein von Textur und Objektstruktur völlig unabhängiges zusätzliches Verfahren ist nötig.

#### 3.2. Richtungsbestimmung über Koordinatennatching

In kontrastarmer Umgebung - z.B. in einem Raum mit geweißten Wänden - versagt das Panorama-Stitching. Die aktive, das infrarote Signal aussendende 3D-Kamera dagegen liefert weiterhin Koordinaten. Zur Berechnung des Winkels zwischen zwei Messungen alleine aus Koordinaten ist es **nicht** erforderlich, dass das Objekt Struktur aufweist: Eine ebene weiße Wand erscheint nach der Drehung der 2D/3D-Totalstation um einen Winkel  $\alpha$  im lokalen Koordinatensystem der zweiten Messung um genau diesen Winkel  $\alpha$  gedreht gegenüber der ersten Aufnahme, was den identischen Ausschnitt in beiden lokalen Koordinatensystemen betrifft (Abb. 3). Bei Mittelung über tausende Koordinatenwerte geht das Rauschen der Distanzmessung in den zu bestimmenden Winkel kaum ein. Weist das Objekt Strukturen auf, so können diese helfen, den einfachen iterativen Prozess der Bestimmung des Drehwinkels aus Koordinaten des überlappenden Ausschnitts zu beschleunigen. Die Methode funktioniert nur dann nicht, wenn das Objekt stark gekrümmt ist

und sich die Station im Zentrum des Krümmungskreises (Zylinder, Kugel) befindet. Sofern Textur vorhanden ist, kann dann die Richtungsbestimmung via Panorama erfolgen. Dass beide redundante Methoden zum Matching - 2D-Bild und 3D-Punktwolke - ausfallen, wird kaum vorkommen können. Das im Prinzip auf die Bestimmung eines einzigen Freiheitsgrades (Rotationswinkel) beschränkte Verfahren arbeitet robust; horizontale und vertikale Verschenkungen lassen sich separat bestimmen.



oben:

Überlagerung zweier um den Horizontalwinkel  $\alpha$  gegeneinander gedrehter lokaler Koordinatensysteme. Die Pfeile zeigen den Betrag der Verschiebung zwischen den Koordinatensystemen (rot  $\rightarrow$  blau) infolge der Drehung. Die wegen der Verschiebung teils verdeckten Messmarken dienen nur der Illustration und Kontrolle der Verschiebung; nicht zur Bestimmung von  $\alpha$ .

unten:

Zur Verdeutlichung, wie der Winkel  $\alpha$  in der Überlagerung der lokalen Systeme auftritt, ist ein schmaler, willkürlich ausgewählter Horizontalstreifen in der Aufsicht dargestellt.

Abb.3 Aufnahmen einer weißen Wand (RGB-eingefärbte Koordinatenpixel)

### 3. 3 Richtungsbestimmung durch Ausreißerbeobachtung

a) Eine Signalüberlagerung an Objektkanten bewirkt Streckenfehler in der Richtung zur Kante. Solche Ausreißer kann man über Tests im Nachbarschaftsvergleich feststellen. Da sie nach einer Verdrehung der Station um den Winkel  $\alpha$  in **derselben** Richtung zum Objekt in ähnlicher Form auftreten, sind sie analog Feature-Punkten zum Matching von Panoramen nutzbar.

b) Die Primärinformationen über die Qualität der Elektronenmengen in den Integrationsbereichen eines jedes Pixel (sog. Flags) liegen auf Seiten der 3D-Kamera vor und können als „Fehlinformationen“ in ähnlicher Weise zur Richtungsbestimmung herangezogen werden.

Fazit: Gleich nach dem Matching - der Registrierung – liegt ein auf den Standpunkt bezogenes, quasi vollständiges Modell der Umgebung vor, ein für viele Zwecke schon hinreichendes Endergebnis unmittelbar nach Aufstellung, Horizontierung und Überstreichen des Aufnahmebereiches. Dies ist ein Novum für die Vermessung - man muss, wenn zugleich Anschlusspunkte zur Georeferenzierung erfasst wurden, darüber hinaus häufig gar nicht mehr messen. Einzelpunkte (vgl. Abb. 4) sind eventuell gesondert zu behandeln, oder es folgen Absteckungen (s.u.).

### 4. Zur praktischen Messung mit der 2D/3D-Totalstation

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele belegen die Relevanz des Systems für praktische Aufgaben.

#### 4.1. Überbrückung größerer Entfernungen

Üblicherweise wird eine moderne Totalstation innerhalb eines prismensignalisierten Festpunktfeldes orientiert. Dies ermöglicht auch die 3D-kamerabasierte Totalstation, denn zu kooperativen Zielen - Reflektoren - wurden trotz der vergleichsweise geringen Sendeleistung Distanzen um 100 m (Einzelprisma), gemessen dank der hervorragenden Unterdrückung des störenden Umgebungslichtes. Diese Entfernungen wurden für zwei verschiedene Modulationsfrequenzen (s. u.) mit einer Präzision von etwa 2cm bis 2,5cm



bestimmt. Die absolute Abweichung lag innerhalb der seitens der Kalibrierung zu erwartenden Unsicherheit. Die Fähigkeit des Systems, passable Entfernungen zu überbrücken, ermöglicht es, wie in der terrestrischen Vermessungspraxis üblich, unterschiedliche Standpunktsysteme miteinander zu verknüpfen und örtliche Systeme in ein globales Netz ein zu binden (Abb. 4).

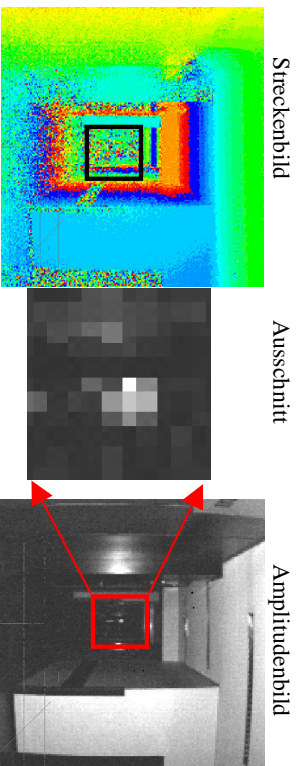


Abb. 4 Raumaufnahme mit Anschluss eines entfernten Reflektorstandpunktes (Ausschnitt; Distanz ca. 63 m). Seine automatische Detektion geschieht durch Kombination von Maximalamplituden und größten Distanzen; eine hohe Genauigkeit wird dank guten Signal-Rausch-Verhältnisses erreicht.

#### 4.2 Automatische Punktidentifizierung und indirekte Koordinatenbestimmung

Nicht nur zu Prismenreflektoren, auch zu Kugeln, die mit reflektierendem Material belegt waren, wurden akzeptable Reichweiten  $>40\text{m}$  erzielt (Abb.5). Zur sicheren Signalisierung und automatischen Identifizierung von Bodenpunkten wurde ein Stab gefertigt mit mehreren Reflektorkugeln in definierten Abständen. Das Abstandsmuster wird im nachgeschalteten Filterprozess in den Daten gesucht. Das direkt reflektierte Signal hebt sich gegenüber der diffus reflektierenden Umgebung ab. Eine Kontrolle erfolgt über die ja bekannten vorgegebenen Zielmarkenabstände. Um Probleme wegen eventuell zu großer Signalintensität zu vermeiden, werden die Koordinaten der Stabspitze aus Messungen zu schwächer reflektierenden rot eingefärbten Kugeln (optimale Reflexion im Infrarot) auf dem Stab berechnet.

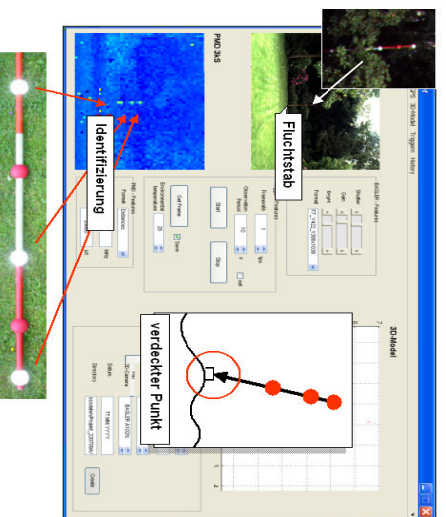


Abb. 5 Automatische Erkennung signalisierter Punkte

#### 4.3 Lokale Vermessungsarbeiten

Wenn sich der Operator mit dem automatisch detektierbaren Stab im Messbereich einer feststehenden Kamera bewegt, kann ähnlich dem Einmannbetrieb mit einer prismenverfolgenden Totalstation gearbeitet werden: Man könnte die Messung per Fernsteuerung auslösen. Zur Erhöhung der Reichweite ließen sich die Reflektorkugeln durch kleine Rundumprismen ersetzen.

#### 4.4 Absteckung

Die Realtime-Überwachung und -Steuerung bei Absteckungen und Objektpositionierungen ist sehr effizient möglich infolge der für die 3D-Kamera charakteristischen Erfassung der kompletten Punktwolke in einer Momentaufnahme, beispielsweise bei Montage und Ausrichtung von Objekten.

#### **4.5 Georeferenzierung mittels GPS**

Erprobt wurde auch die Einbeziehung einer bewegten Satellitenantenne in das Kameragesichtsfeld. Die mit Reflektorkugeln signalisierte Antenne (analog Fluchtstab s. v.) wurde durch das Gesichtsfeld geführt, die Zeitpunkte der GPS-Koordinatenausgabe registriert und die 3D-Kamera hierzu synchronisiert. Die Kameraposition und die Blickrichtung konnten so direkt georeferenziert werden.

#### **4.6 Fein- und Grobmaßstabmessung**

In den aufgeführten Praxisbeispielen waren die Entfernungen oft größer als die Feinmaßstabslänge der hier eingesetzten PMD-Kamera von 7,5m. Also wurde nur das Reststück zu den Vielfachen von 7,5m angezeigt. Zur Bestimmung der Anzahl der ganzzahligen Maßstabsvielfachen erfolgte eine zweite Distanzmessung mit einer um 5% bzw. 10% verminderten Modulationsfrequenz. Aus den Differenzen zwischen zwei Messungen ließ sich - wie schon in den Anfängen der elektronischen Entfernungsmessung allgemein üblich - die Anzahl der Vielfachen des Feinmaßstabes bis zur neuen Eindeutigkeitsgrenze, definiert durch die Differenzfrequenz, ermitteln. Die Frequenzumstellung erfolgte aus dem Programm heraus problemlos über den Steuerrechner.

### **5. Perspektiven**

Die praktische Nutzung des Systems erfordert eine hinreichende und damit heute noch umfangreiche Kalibrierung der PMD-Kamera. Fragen zur Genauigkeit von PMD-Kameras stehen derzeit noch im Vordergrund; die aufgezeigten methodischen - und zweifellos auch auf Seiten der Geräte- und Arbeitskosten beträchtlichen - Vorteile können erst voll ausgeschöpft werden, wenn eine im Vergleich zu aktuellen geodätischen Instrumenten passable Streckenmessgenauigkeit erzielt wird. Verschiedene Indizien lassen darauf schließen, dass diese Genauigkeitsanforderungen in absehbarer Zeit erfüllt sein werden:

1. Der Fortschritt auf Seiten der Hardware war innerhalb weniger Jahre erheblich. Die Vorgängergenerationen des CamCube 2.0 wiesen eine wesentlich geringere Auflösung auf, waren empfindlicher gegenüber Fremdlicht und schwerfällig bei Änderung der Integrationszeiten, hatten eine geringere Reichweite, waren nicht programmierbar, instabiler bezüglich typischer Parameter, ohne Ausgabe von Flags zur Beurteilung der Datenqualität u. a. m..
2. Der Effekt der Entfernungsdeformation infolge optischen Übersprechens stellt derzeit die größte Einschränkung für eine präzise Aufnahme dar, da er großräumige systematische Deformationen wie z.B. Ausrundungen von Innenkanten bewirken kann. Dieser Einfluß von externem Übersprechen lässt sich aber stark minimieren, wenn die Phasenentfernungsmessung durch Laufzeitmessung (echtes ToF) ersetzt wird; neue Entwicklungen weisen in diese Richtung .
3. Alle anderen „Wunschparameter“ werden wahrscheinlich schon infolge der breiten Nutzung von PMD-Kameras in Industrie, Fertigung, Medizin und Fahrzeugtechnik rasch verbessert. Verglichen hiermit verlief die Entwicklung der geodätischen elektronischen Distanzmessung zwischen 1950 und 1990 sehr langsam, auf den schmalen Sektor der Vermessung ausgerichtet.

Insbesondere Fragen zur Genauigkeit werden sich wegen des offensichtlich hohen Innovationsdrucks voraussichtlich bald anders stellen als heute. Werden alle hier ermittelten Korrekturen angebracht, ist heute für die erzeugten dreidimensionalen Koordinaten mit einer absoluten Genauigkeit von 0,7cm + 2,4cm / 10m (nicht weiter linear – ca. 2,8 cm bei 60m) zu rechnen, abhängig von den Bedingungen bei der Aufnahme. Die Reichweite beträgt ca. 10m zu nichtkooperativen und ca. 150m zu kooperativen Zielen..

Die 2D/3D-kamerabasierte Totalstation - incl. Steuerrechner - weist im Prinzip alle Eigenschaften einer modernen Video-Totalstation auf. Die Vielfalt der Funktionen und die für viele Operationen genügende Reichweite (weit über den Eindeutigkeitsbereich hinaus, s. o.) rechtfertigen die Bezeichnung dieses Gerätetypus als 2D/3D-Totalstation. Das Instrumentarium leistet bezüglich Reichweite und Genauigkeit derzeit zwar noch weniger als heutige Videotalstationen, beinhaltet aber zusätzlich die scanneradäquate „Momentaufnahmefunktion“ zur Erzeugung von RGB-eingefärbten Punktwolken zur Aufnahme von ca.

200000 Punkten pro Sekunde (bei 5 fps), wobei der Koordinatenfilm per se mehr Informationen bereitstellt als z.B. das sequentielle Laserscannen. Gemäß der ursprünglichen Bedeutung des Tachymeters als schnell messendes Universalinstrument (τάχως = schnell) kommt das hier konzipierte Gerät dem frühen Ideal nahe.

Bereits mit dem heutigen hier dargestellten Prototyp sind z.B. Aufnahmen im Facility Management, bei Unfalldokumentation oder Innenraumerfassung, in Forensik oder Speleologie, auch sogar Arbeiten im Gelände unter Einbindung des oben beschriebenen Reflektorstrabes sinnvoll möglich. Letzteres gestaltet sich wegen der Eigenschaft zur Erfassung der Punktwolke als „Schnappschuss“ sogar prinzipiell einfacher als mit einer modernen Totalstation. Auch die Kombination aller skizzierten eigenständigen Betriebsmodi unter Nutzung der Referenzierung über GPS/GNSS und der Einbindung von entfernteren, reflektor-signalisierten Zielen bietet reizvolle neue Möglichkeiten für Vermessung, Objekterfassung und Visualisierung in allen Sparten, welche Raumdaten im mittleren Entfernungsbereich (1 m – 100 m) benötigen.