

STUDI KINERJA *HANDHELD PORTABLE 3D SCANNER* DALAM PENGUKURAN DIAMETER DAN KEDALAMAN LUBANG PADA SPESIMEN LOGAM

¹Anang Wahyu Setiawan, ²Muslimin, ³Ghany Heryana

^{1,2,3}Politeknik Negeri Jakarta

Email: ¹anang.wahyusetiawan.tm20@mhs.wpnj.ac.id, ²muslimin@mesin.pnj.ac.id,
³ghany.heryana@mesin.pnj.ac.id

Abstrak

Handheld portable 3D Scanner adalah alat berbasis optik yang dapat digenggam dengan tangan dan dipindahkan dari satu tempat ke tempat lainnya. Alat ini digunakan untuk pemindaian permukaan *part* dan menghasilkan representasi 3 dimensi berbentuk *point cloud*. Penggunaan *3D Scanner* tumbuh signifikan dalam beberapa tahun terakhir khususnya dalam aplikasi bidang metrologi, inspeksi industri manufaktur dan *reverse engineering*. Terlepas dari kemudahan pemakaian dan fleksibilitas penggunaannya, sebagai alat berbasis optik dengan prinsip triangulasi, *Handheld portable 3D Scanner* memiliki keterbatasan dalam memindai bentuk geometri lubang sempit atau celah. Spesifikasi yang diterbitkan oleh pabrikan belum sepenuhnya menggambarkan kinerja alat dalam hal ini. Untuk itu dilakukan evaluasi kinerja *Handheld 3D Scanner* melalui penentuan *error* dan *En number* pengukuran lubang pada benda kerja dengan variasi kedalaman dan diameter. Sebagai nilai acuan digunakan hasil pengukuran *Coordinate Measuring Machine – CMM*. Hasil studi menunjukkan *handheld 3D scanner* secara umum memiliki *error* pengukuran diameter dan pengukuran kedalaman lubang, di atas spesifikasi 0.03 mm. Pada lubang dengan diameter 1 mm, *handheld 3D scanner* memiliki hubungan *error* pengukuran kedalaman lubang terhadap kedalaman lubang dengan persamaan regresi : $y = 0.037x - 0.54$. Nilai *En* berkategori “*outlier*” ditemukan pada lubang berdiameter 1 mm dengan kedalaman 0.5, 1, 2, 4 mm dan lubang berdiameter 2mm dengan kedalaman 4 mm.

Kata Kunci: *Handheld Portable 3D Scanner, error pengukuran, triangulasi*

Abstract

A *Handheld portable 3D Scanner* is an optical-based tool that can be gripped by hand and moved from one place to another. This tool is used to scan part's surface and produce a 3-dimensional representation in the form of a point cloud. The use of *3D Scanners* has grown significantly in recent years, especially in applications in the metrology, industrial manufacturing inspection, and reverse engineering. Apart from the ease of use and flexibility of use, as an optical-based tool with triangulation principles, *Handheld Portable 3D Scanners* have limitations in scanning the geometric shape of a narrow hole or slit. The specifications published by the manufacturer do not fully describe tool's performance in this regard. For this reason, an evaluation of the performance of the *Handheld Portable 3D Scanner* is carried out by determining the error of measuring holes on the workpiece with variations in depth and diameter. As a reference value, the results of the *Coordinate Measuring Machine –CMM* measurement are used. . The study result show that *handheld 3D scanners* generally have an error in measuring the diameter and measuring the depth of the hole, above the specification of 0.03 mm. In holes with a diameter of 1 mm, the *handheld 3D scanner* has a relationship between the error of measuring hole's diameter and hole's diameter with the regression equation: $y=0.037x-0.54$. *En* values categorized as "outliers" were found in holes with a diameter of 1 mm with a depth of 0.5, 1, 2, 4 mm and holes with a diameter of 2mm with a depth of 4 mm.

Keywords: *Handheld Portable 3D Scanner, measurement error, triangulation*

I. PENDAHULUAN

Penggunaan *3D Scanner* tumbuh signifikan dalam beberapa tahun sebagai alternatif CMM (*Coordinate Measuring Machine*) khususnya dalam aplikasi bidang metrologi, inspeksi industri manufaktur, industri kedirgantaraan, otomotif, dan *reverse engineering*.

Meskipun tidak memiliki tingkat akurasi yang setara dengan CMM, *Optical 3D Scanner*, memiliki keunggulan dalam portabilitas, kemampuan pengukuran cepat, pengambilan *point cloud*¹, dan relatif mudah saat mengukur permukaan *freeform* / bentuk bebas.

Scanner 3D menggunakan prinsip triangulasi laser atau prinsip *Time of Flight* – TOF. Dalam sistem berbasis triangulasi, variasi jangkauan dan kedalaman terbatas, tetapi memiliki presisi yang tinggi. Sebaliknya terjadi pada sistem TOF yang memiliki presisi rendah, variasi kedalaman dan jangkauan yang besar. (França *et al*., 2005)

Beberapa tahun belakangan, pengembangan *3D Scanner* mengarah pada *3D Scanner* yang *portable*, *handy* dan akurat sesuai dengan minat pasar. *Handheld portable 3D Scanner* adalah alat berbasis optik yang dapat digenggam dengan tangan dan dipindahkan dari satu tempat ke tempat lainnya untuk melakukan pemindaian terhadap permukaan *part* dan menghasilkan representasi 3 dimensi berbentuk *point cloud*. Selain karena naiknya minat pasar untuk menggunakan alat ini dipilihnya alat ini untuk dibahas dalam makalah ini karena sebagai alat *3D scanner* yang menggunakan prinsip triangulasi, salah satu keterbatasan yang perlu diketahui adalah kemampuan memindai dan mengukur dimensi kedalaman dari celah atau lubang sempit dari benda kerja. Spesifikasi yang diterbitkan oleh pabrikan belum sepenuhnya menggambarkan kinerja dalam hal akurasi pengukuran dimensi lubang sempit benda kerja. Dengan mengetahui keterbatasan ini, pengguna alat akan dapat memakai alat sesuai batasnya dan memilih alat yang cocok untuk jenis pekerjaan tertentu.

Tujuan Penelitian dan Manfaat

Untuk mengetahui relasi antara *error handheld portable 3D scanner* dalam pengukuran lubang

pada benda kerja dengan variasi kedalaman dan diameter, dilakukan penelitian secara eksperimental melalui perbandingan data yang diperoleh dari pengukuran benda kerja oleh CMM dengan *handheld portable 3D scanner*. Benda yang diukur adalah artefak sesuai dengan rekomendasi Mendricky (Mendricky 2015). Berbeda dengan yang dilakukan Mendricky, pada penelitian ini uji kinerja dilakukan pada *handheld portable 3D scanner*. Sedangkan Mendricky menguji *3D Scanner* yang statis (*non handheld*)

Adapun tujuan umum penelitian ini adalah untuk melakukan studi kinerja melalui penentuan error pengukuran lubang pada benda kerja dengan variasi kedalaman dan diameter

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat kepada pemilik alat mengenai error dan keterbatasan alat dalam mengukur bentuk geometri berupa lubang.

Dalam skala yang lebih luas, pengetahuan dan pengalaman dalam menentukan akurasi *handheld portable 3D scanner* dapat didesiminasikan ke industri manufaktur sehingga secara bertahap meningkatkan kualitas pengukuran yang dilakukan.

Permasalahan

Masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini adalah : Bagaimana kinerja *handheld portable 3D scanner* dalam pengukuran lubang pada spesimen logam dengan variasi kedalaman dan diameter

Teori

Error, mengacu pada definisi VIM (*international vocabulary of metrology*) adalah “*measured quantity value minus a reference quantity value*”. Dalam penelitian ini, *reference quantity value* didapat dari hasil pengukuran menggunakan CMM. CMM memiliki akurasi sekitar 0.003 mm, sedangkan *handheld portable 3D scanner* berdasarkan data spesifikasi teknis pabrikan memiliki akurasi sekitar 0.03 mm. Secara umum, sumber error 3D scanner adalah (Muslimin 2020)

- *dataset error* yakni error yang dihasilkan oleh cacat proses pemindaian seperti noise, lubang,

¹ kumpulan data yang mewakili objek atau ruang. Titik-titik ini mewakili koordinat geometrik X, Y, dan Z dari satu titik pada permukaan yang dipindai

pergeseran dan data yang tidak benar lainnya dan

- registration error yakni error akibat proses alignment dan fitting antara data-data yang teregister.

Perbedaan prinsip mendasar *stationary 3D scanner* dengan *handhel portable 3D scanner* adalah dalam metode penentuan posisi / *positioning method*. *Stationary 3D scanner* adalah *3D scanner* yang terpasang pada lengan /*arm* atau tripod dan tetap pada posisinya. Pengguna memutar objek yang dipindai secara bertahap sehingga seluruh objek tersebut dipindai oleh *3D Scanner*. Objek juga dapat diletakkan di atas piringan yang berotasi dengan kecepatan yang dapat diatur. Sensor kamera menangkap pantulan sinar laser yang ditembakkan oleh *3D Scanner*. *Software* mengolah citra dalam format koordinat cartesian (x, y, z) dengan menggunakan posisi *3D Scanner* yang tetap sebagai referensi dan menggabungkan potongan citra tersebut menjadi satu model digital yang utuh.

Portable 3D Scanner adalah *3D Scanner* yang dapat dibawa secara bebas tidak terpasang dalam posisi yang tetap. Dalam melakukan pemindaian, *handheld portable 3D scanner* menggunakan objek yang dipindai sebagai referensi, tidak menggunakan referensi eksternal, di luar objek. Dalam hal ini penentuan posisi dilakukan dengan menggunakan 3 cara yakni:

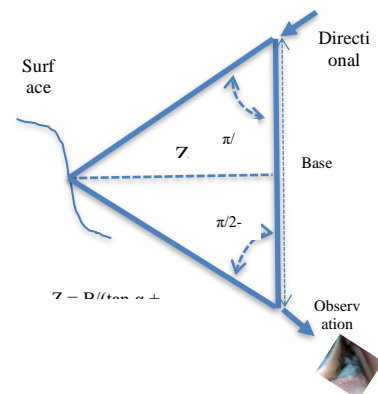
- Referensi berupa target yang ditempelkan pada objek. Bentuk target biasanya berupa geometri yang sederhana seperti lingkaran, ditempelkan pada objek atau bila objek tidak dapat disentuh, target ditempelkan di sekitar objek;
- Referensi berupa pola, bentuk atau warna objek;
- Referensi berupa perpaduan antara target yang ditempelkan pada objek dan bentuk atau warna objek tersebut.

3D Scanner menggunakan prinsip triangulasi untuk menentukan posisi sebuah titik. Secara grafis dapat dilihat pada Gambar 1. Penggunaan prinsip triangulasi ini memiliki keterbatasan dalam mengukur kedalaman lubang. Prinsip triangulasi pada pengukuran kedalaman lubang dapat dilihat pada Gambar 2.

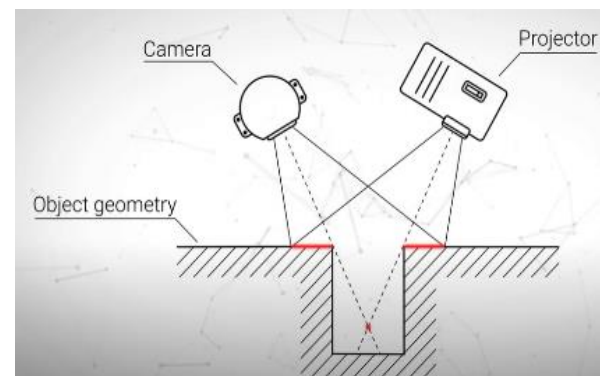
Kuantifikasi kemampuan untuk memindai bagian lubang yang lebih dalam telah dilakukan oleh

Mendricky (Mendricky 2015). Pandangan kamera pada dinding silinder dibatasi oleh bentuk lingkaran saat memindai lubang, dan oleh karena itu dimungkinkan untuk menangkap hanya sebagian dari dinding silinder yang menyerupai permukaan parabola pada satu pengambilan gambar. Hasil rasio keliling lubang dan jumlah pemindaian menentukan pada kedalaman berapa dimungkinkan untuk memindai permukaan silinder sepenuhnya (Gambar 3)

Studi ini mensitasi beberapa penelitian sebelumnya terkait penentuan ketidakpastian pengukuran benda kerja oleh CMM dan mengusulkan prosedur pengukuran benda kerja oleh *handheld portable 3D scanner*, dimana akan diperoleh nilai error dan ketidakpastian pengukurannya. Nilai error diperoleh dari selisih hasil pengukuran CMM dengan hasil pengukuran *handheld portable optical 3D scanner* pada benda kerja. Uraian lebih lanjut beserta perbandingan dengan penelitian sebelumnya dijelaskan pada paragraf di bawah.



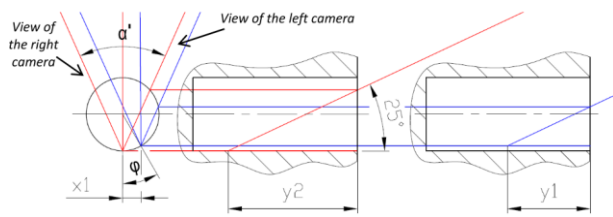
Gambar 1. Prinsip Triangulasi²



Gambar 2. Prinsip triangulasi pada pengukuran dimensi kedalaman lubang³

² Gambar diambil dari "Characterization of Triangulation 3D – Based Imaging System using certified artifact", pg. 51, NCLSI Measure Journal Science, Vol 7 no 4, 2012

³ (<https://www.youtube.com/watch?v=p33qxdEwVc>"3D Scanner: How It Works?", Dilihat pada 07 Juli 2021



Gambar 3. Sudut pandang kamera pada 3D Scanner

Beberapa penelitian terkait benda kerja telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Takatsuji, et al (Takatsuji, Osawa, and Sato 2008) merekomendasikan benda kerja yang dilapisi dengan Ti N karena hasil pengukuran menunjukkan kecenderungan yang stabil. Genta et, al (Genta, Minetola, and Barbato 2016) mengembangkan *reference ball plate* sebagai benda kerja.

Sesuai dengan tujuan penelitian ini, pembuatan benda kerja mengacu pada spesifikasi yang ditetapkan oleh Mendricky (Mendricky 2015), yakni berupa lubang dengan variasi diameter dan kedalaman.

Untuk mendapatkan hasil pengukuran CMM yang tertelusur secara metrologis, CMM perlu diverifikasi terlebih dahulu. Verifikasi mengacu pada ISO 10360 - 2 *Geometrical Product Specifications (GPS) -- Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) Part 2 : CMMs used for measuring linear dimensions*. Verifikasi yang dilakukan mencakup:

- Menguji kesalahan penunjukan CMM terhadap benda kerja terkalibrasi dalam hal ini *gauge block*;
 - Menguji repeatability pengukuran *gauge block*.
- Setelah CMM diverifikasi, untuk mendapatkan hasil pengukuran CMM yang tertelusur, hasil pengukuran CMM harus disertai dengan pernyataan ketidakpastian pengukuran. Penelitian mengenai metode estimasi ketidakpastian pengukuran CMM cukup banyak. Salah satunya dilakukan oleh Cheng et al (Cheng et al. 2018) dengan pembahasan mengenai penetapan sumber ketidakpastian CMM *task-oriented* utama yang mencakup: ketidakpastian yang disebabkan oleh bias dan *linearity*, ketidakpastian yang disebabkan oleh resolusi dan *repeatability*, ketidakpastian yang disebabkan oleh *reproducibility*. Dengan alasan kemudahan dan kepraktisan penerapan, maka dalam penelitian ini pendekatan yang akan digunakan adalah

pendekatan yang diusulkan oleh Cheng et al. (Cheng et al. 2018)

Handheld portable 3D scanner adalah salah satu jenis *3D scanner*. Penelitian yang terkait dengan karakteristik *3D scanner* sejauh ini dilakukan oleh beberapa peneliti. Mendricky et al (Mendricky 2016), membahas mengenai penentuan akurasi pengukuran *3D scanner* dengan menggunakan artefak buatan sendiri yang mengacu pada standar VDI/VDE 2634 – part 3 [VDI/VDE 2634 2008]. Phillips et al (Phillips et al, 2009), mendiskusikan mengenai konsep ketertelusuran metrologi ke unit panjang, meter, *International System of Units (SI)* unit kemajuan dan tantangan ketertelusuran dari *3D imaging data*. Vagovsky et al (Vagovsky, Buranský, and Görög 2015), meneliti *measurement capability* dari *3D scanner* bermerk GOM ATOS Triple Scan II khususnya dalam memindai benda - benda berukuran kecil. Polo et al (Polo and Felicísimo 2012), menganalisa ketidakpastian dan *repeatability scanner* berharga murah dalam pengukuran dimensi sebuah objek. Nilai referensi objek diperoleh dari hasil pengukuran menggunakan caliper yang terkalibrasi.

Genta et al (Genta, Minetola, and Barbato 2016), mengusulkan prosedur kalibrasi untuk *scanner* dengan prinsip triangulasi disertai dengan evaluasi ketidakpastiannya. Dalam penelitian ini Genta, et al mengembangkan alat standar berupa *reference ball plate* yang diukur dengan alat CMM. Prosedur kalibrasi yang dikembangkan mengacu pada ISO 10360-2 dan estimasi ketidakpastiannya menggunakan data *reproducibility* pengukuran.

Berbeda dengan CMM, ketertelusuran metrologis *3D Scanner*, belum banyak dicakup dalam dokumen standar. (Mendricky 2016) (Guidi 2013), Dokumen standar yang ada seperti VDI/VDE 2634 tidak menjelaskan estimasi ketidakpastian ini secara terperinci.

Beraldin, et al (Beraldin, MacKinnon, and Cournoyer 2015) mengidentifikasi komponen ketidakpastian *3D Scanner* mencakup: metode pengukuran, sifat material benda yang diukur, operator dan *hardware*. Namun demikian metodologi untuk mengidentifikasi ketidakpastian pengukuran tersebut tidak diuraikan lebih jauh. Terkait dengan *handheld portable 3D scanner*, Givi, et al (Givi et al, 2019) melakukan evaluasi kinerja pada *handheld portable 3D scanner* dengan cara membandingkan hasil pengukuran *ball bar*

dengan hasil pengukuran CMM. Identifikasi akurasi dan kontributor kesalahan pengukuran *handheld portable 3D scanner* dilakukan dengan menggunakan benda kerja berupa 4 buah bola yang diletakkan di atas platform dengan jarak tertentu. Terkait dengan kemampuan *3D scanner* dalam memindai benda lubang maupun celah, Mendricky (Mendricky 2015) mengusulkan benda kerja dengan variasi diameter dan kedalaman lubang yang digunakan untuk mengevaluasi kinerja *3D scanner*. Terkait dengan peningkatan kinerja *3D scanner*, Emam et al, (Emam, Khatibi, and Khalili 2014) mengusulkan model matematis *dithering technique* (DT) dan menerapkan untuk meningkatkan akurasi *3D scanner*. Guilherme et al, (França et al>, 2005) mengembangkan sistem *3D scanner* dengan presisi dan jangkauan yang lebih baik daripada pemindai 3D berbasis triangulasi laser tradisional, namun juga *versatile* /serbaguna seperti sistem TOF.

State of the art usulan penelitian

Pada penelitian ini , dilakukan uji kinerja *handheld portable 3D scanner* melalui penentuan error pengukuran lubang pada benda kerja dengan variasi kedalaman dan diameter.

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan alat :

Penelitian dilakukan dalam beberapa tahap berikut :

Tahap 1 : Pembuatan benda kerja

Tahap 2 : Verifikasi CMM menggunakan metode uji sesuai dengan ISO 1360-2

Tahap 3: Pengukuran diameter dan kedalaman lubang menggunakan CMM beserta ketidakpastiannya

Tahap 4 : Pengukuran diameter dan kedalaman lubang benda kerja menggunakan 3D Scanner beserta ketidakpastiannya.

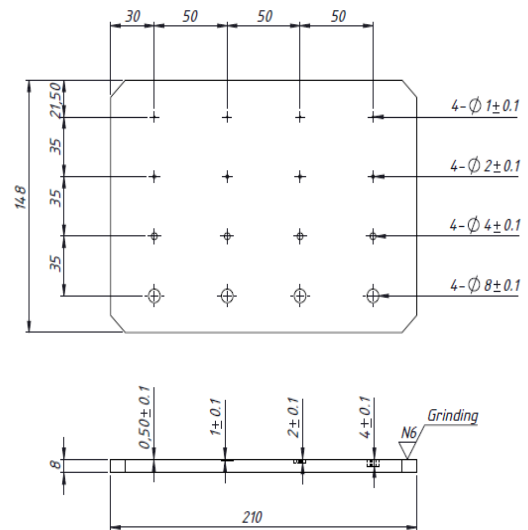
Tahap 5 : Analisa hasil pengukuran dan penentuan error dan nilai En number.

Uraian lebih lengkap setiap tahapan dapat dilihat pada penjelasan berikut.

Tahap 1 :

Pembuatan benda kerja yakni berupa pelat berlubang dengan variasi ukuran diameter dan kedalaman tertentu. Lubang pada pelat dibuat melalui *milling* CNC. Ujung lubang dibuat lurus

dengan *tool endmill*. Bentuk benda kerja dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 4. Desain benda kerja yang digunakan dalam studi ini



Gambar 5. Spesimen logam yang digunakan

Tahap 2 :

Verifikasi CMM menggunakan metode uji sesuai dengan ISO 1360-2

- Laksanakan *Acceptance Test* menggunakan alat standar yang terkalibrasi dan tertelusur ke SI

Tahap 3:

Lakukan pengukuran diameter masing – masing lubang ($D_{\text{lubang_CMM}}$) dan kedalaman lubang ($d_{\text{lubang_CMM}}$) sebanyak 3 x. Tentukan *repeatability* per percobaan. Dari semua percobaan tentukan *reproducibility* , hitung ketidakpastian pengukuran $U_{95_MEAS_CMM}$ sesuai rekomendasi Cheng dkk. (Cheng et al>, 2018)

Tahap 4

Lakukan pemindaian benda kerja , menggunakan *handheld portable 3D scanner* untuk parameter

yang sama : diameter lubang ($D_{LUBANG_SCANNER}$) dan kedalaman lubang ($d_{LUBANG_SCANNER}$) Tentukan :

- pembacaan *software* untuk diameter dan kedalaman lubang;
- error diameter lubang hasil pengukuran *3D scanner* , $E_{D_scanner} = D_{lubang_CMM} - D_{lubang_SCANNER}$
- error kedalaman lubang hasil pengukuran *3D scanner*, $E_{d_scanner} = D_{lubang_CMM} - D_{lubang_SCANNER}$
- *repeatability* per percobaan.
- Dari semua percobaan tentukan *reproducibility uncertainty* sesuai dengan rekomendasi Givi. et, al.[13]

Tahap 5 :

Lakukan analisa hasil pengukuran *handheld portable 3D scanner* benda kerja
Tentukan error pengukuran lubang pada benda kerja berikut nilai En number-nya.

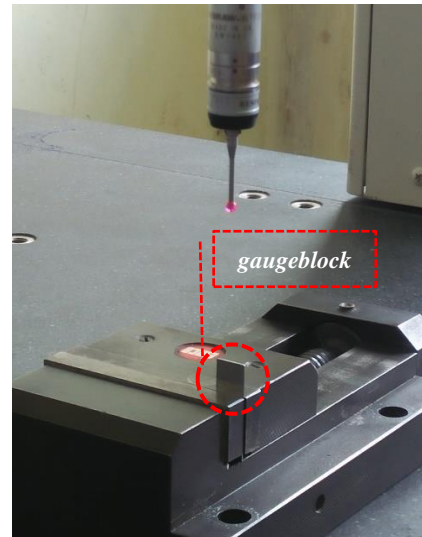
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil verifikasi CMM

Verifikasi CMM dilakukan untuk mengetahui berapa error CMM, sejauh mana pemenuhannya terhadap spesifikasi teknis *Maximum Permissible Error (MPE)*, dan apakah akurasi CMM ini memenuhi untuk dijadikan acuan dalam studi kinerjanya.

Metode verifikasi mengacu pada ISO 10360-2 *Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) — Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions* dengan modifikasi pada titik ukur yang diverifikasi. Verifikasi dilakukan terhadap sumbu x, y, z CMM. Titik ukur yang diverifikasi adalah titik ukur untuk dimensi kedalaman 0,5; 1; 2; 4 mm dan titik ukur untuk dimensi diameter lubang yakni : 1; 2; 4; 8 mm

Verifikasi dilakukan dengan menggunakan *gaugeblock* yang digenggam dengan ragum.

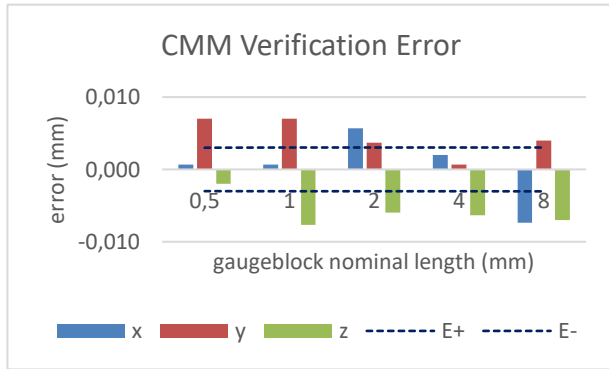


Gambar 6. Verifikasi CMM dengan gaugeblock

Data hasil verifikasi dapat dilihat pada tabel di bawah ini. Nilai error diperoleh dari nilai rata – rata pembacaan CMM dikurangi dengan nilai nominal *Gauge Block*.

Tabel 1. CMM Measurement Error

		nilai nominal Gauge Block (mm)				
sumbu		0.5	1	2	4	8
x		0.498	0.993	1.995	3.997	8.004
		0.499	1	1.994	3.997	8.012
		0.501	1.005	1.994	4	8.006
y		0.493	0.998	1.998	3.996	7.995
		0.494	0.983	1.994	4.005	7.996
		0.492	0.998	1.997	3.997	7.997
z		0.501	1.008	2.006	4.006	8.008
		0.502	1.008	2.005	4.008	8.009
		0.503	1.007	2.007	4.005	8.004
Error						
sumbu		0.5	1	2	4	8
x		0.0007	0.0007	0.0057	0.0020	-0.0073
y		0.007	0.007	0.004	0.001	0.0040
z		-0.002	-0.008	-0.006	-0.006	-0.007



Gambar 7. Grafik CMM Measurement Error terhadap Maximum Permissible Error (MPE) CMM

Mengacu pada spesifikasi teknis CMM, MPE untuk CMM *Crysta M443* adalah : $E = (3.0 + 4,0L/1000)$ μm , L dalam mm.

Dengan memasukkan $L = 0.5, 1, 2, 4, 8$ mm, maka diperoleh MPE sebesar $3 \mu\text{m}$. Dari tabel dapat dilihat bahwa *Maximum Error* yang diperoleh adalah $8 \mu\text{m}$ yang mana ini melebihi MPE CMM. Hasil *Analysis of Variance (ANOVA)* menunjukkan, tidak ada perbedaan signifikan antara pengukuran *gaugeblock* dari arah sumbu x, sumbu y maupun sumbu z, sebagaimana dapat dilihat pada tabel di bawah ini .

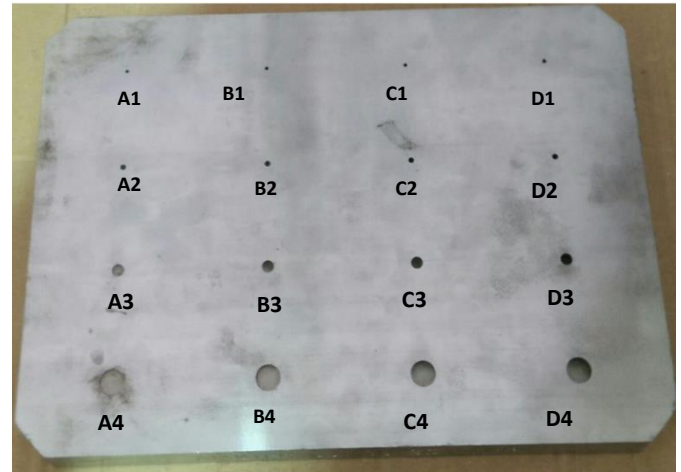
Tabel 2. ANOVA pengukuran *gaugeblock* pada arah sumbu x, y, z

Source of Variation	SS	Df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	5.28E-05	4	1.32E-05	0.37	0.82	3.47
Within Groups	0.00035	10	3.524E-05			
Total	0.000405	14				

Berdasarkan hasil ANOVA tersebut, dapat disimpulkan bahwa faktor keterampilan operator yang tercermin dari variasi gaya stylus/ peraba, faktor posisi stylus, serta faktor kestabilan cengkraman ragam tidak berpengaruh signifikan terhadap variasi error. Nilai error yang melebihi MPE bersumber dari faktor-faktor lain yang belum teridentifikasi dalam studi ini. Meskipun melebihi MPE, nilai ini masih di bawah akurasi *Handheld 3D Scanner* yang akan diuji kinerjanya, yakni $30 \mu\text{m}$. Dengan demikian, CMM ini dapat digunakan sebagai acuan dalam studi evaluasi kinerja *3D handheld scanner* .

Hasil Pengukuran Benda Kerja oleh CMM

Setelah dilakukan verifikasi terhadap CMM, langkah selanjutnya adalah pengukuran diameter dan kedalaman lubang pada benda kerja oleh CMM tersebut. Masing – masing lubang pada benda kerja



Gambar 8. Indeks yang mewakili diameter dan kedalaman tertentu.

- A mewakili kedalaman 0.5 mm
- B mewakili kedalaman 1 mm
- C mewakili kedalaman 2 mm
- D mewakili kedalaman 4 mm

- 1 mewakili diameter 1 mm
- 2 mewakili diameter 2 mm
- 3 mewakili diameter 4 mm
- 4 mewakili diameter 8 mm

Masing – masing lubang diukur 3 kali . Hasil rata – rata, pengukuran diameter (D) dan kedalaman (d) masing – masing lubang dapat dilihat pada tabel di bawah

Tabel 3. Rata-rata hasil pengukuran diameter (D)

kedalaman	$D_{\text{rata-rata}}$ (mm)			
	1	2	4	8
(A) 0.5	1.712	1.953	3.944	7.915
(B) 1	1.245	1.913	3.933	7.987
(C) 2	1.299	1.887	3.951	7.976
(D) 4	1.534	1.976	3.959	7.990

Tabel 4. Rata – rata hasil pengukuran kedalaman

diameter	$d_{\text{rata-rata}}$ (mm)			
	(A) 0.5 mm	(B) 1 mm	(C) 2 mm	(D) 4 mm
1 mm	0.485	1.003	1.985	3.999
2 mm	0.519	0.978	1.981	3.991
4 mm	0.504	0.992	1.985	3.978
8 mm	0.519	1.017	2.007	4.015

Dari tabel di atas dapat dilihat pada diameter 1 mm, hasil pengukuran CMM menunjukkan penyimpangan yang besar. Besarnya penyimpangan

ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Tip *stylus* yang digunakan memiliki ukuran nominal diameter sebesar 1 mm. Berdasarkan hasil kalibrasi menggunakan bola kalibrasi, ukuran aktual tip *stylus* adalah 0.993 mm Dengan ukuran *stylus* yang mendekati diameter lubang tersebut, ada celah kurang lebih 0.007 mm. Pada saat *probe* digerakkan dan menyentuh permukaan lubang, sensor tidak seketika mendeteksi sentuhan tersebut hingga *probe* digerakkan lebih jauh lagi. Akibatnya ada pergeseran titik koordinat yang terdeteksi yang mengakibatkan kesalahan pengukuran diameter lubang. Efek ini disebut sebagai *pretravel length*. (Woźniak and Dobosz 2003).

Karena error yang cukup besar, hasil pengukuran diameter lubang benda kerja 1 mm oleh CMM tidak dapat dijadikan sebagai nilai acuan. Sedangkan untuk titik ukur lainnya dapat digunakan sebagai nilai acuan.

Adapun untuk hasil pengukuran kedalaman lubang benda kerja, dapat digunakan sebagai nilai acuan tuntut semua titik ukur.

Ketidakpastian Pengukuran CMM

Setelah hasil pengukuran CMM untuk diameter dan kedalaman, selanjutnya dilakukan penentuan nilai ketidakpastian pengukuran tersebut. Nilai ketidakpastian pengukuran diameter diperoleh dari persamaan (1) sedangkan untuk kedalaman diperoleh dari persamaan (2) :

$$U_{95_MEAS_D_CMM} = 2 \cdot u_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{E_{L,MPE}^2}{3} + u_{r,D}^2 + u_{R,D}^2} \quad (1)$$

$$U_{95_MEAS_d_CMM} = 2 \cdot u_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{E_{L,MPE}^2}{3} + u_{r,d}^2 + u_{R,d}^2} \quad (2)$$

- $U_{95_MEAS_D_CMM}$ adalah ketidakpastian gabungan dengan tingkat kepercayaan 95% untuk pengukuran diameter oleh CMM
- $U_{95_MEAS_d_CMM}$ adalah ketidakpastian gabungan dengan tingkat kepercayaan 95% untuk pengukuran kedalaman oleh CMM
- $E_{L,MPE}$ adalah *Maximum Permissible Error* CMM
- u_r adalah ketidakpastian dari *repeatability of measurement*
- u_R adalah ketidakpastian dari *reproducibility of measurement*

Hasil penghitungan ketidakpastian dapat dilihat pada tabel di bawah ini

Tabel 5. U_{95} pengukuran diameter oleh CMM

diameter	$U_{95_cmm_diameter}$			
	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
(A) 0.5	-	0.043	0.015	0.150
(B) 1	-	0.050	0.017	0.037
(C) 2	-	0.061	0.019	0.036
(D) 4	-	0.040	0.016	0.036

Tabel 6. U_{95} pengukuran diameter oleh CMM

diameter	$U_{95_cmm_kedalaman}$			
	(A) 0.5 mm	(B) 1 mm	(C) 2 mm	(D) 4 mm
1 mm	0.017	0.017	0.013	0.025
2 mm	0.017	0.061	0.013	0.016
4 mm	0.017	0.018	0.014	0.017
8 mm	0.017	0.018	0.016	0.016

Hasil Pengukuran Benda Kerja oleh *Handheld Portable 3D Scanner*

Setelah mendapatkan nilai acuan pengukuran dari CMM, dilakukan pengukuran benda kerja oleh *handheld 3D scanner*. Hasil pengukuran dapat diameter dan kedalaman lubang pada benda kerja dapat dilihat pada Tabel 7 dan Tabel 8 di bawah.

Tabel 7. Rata-rata hasil pengukuran diameter (D) *handheld 3D scanner*

kedalaman	$D_{rata-rata}$ (mm)			
	1	2	4	8
(A) 0.5	1.190	2.036	4.041	7.896
(B) 1	1.219	2.044	3.925	7.987
(C) 2	0.944	1.936	3.884	7.832
(D) 4	0.864	1.936	4.001	7.881

Tabel 8. Rata – rata hasil pengukuran kedalaman (d) *handheld 3D scanner*

diameter	$d_{rata-rata}$ (mm)			
	(A) 0.5	(B) 1	(C) 2	(D) 4
1 mm	0.415	0.742	0.634	0.662
2 mm	0.508	0.963	1.895	0.818
4 mm	0.502	0.977	1.959	3.899
8 mm	0.522	1.014	2.018	4.010

Ketidakpastian Pengukuran *Handheld 3D Scanner*

Setelah hasil pengukuran *handheld portable 3D scanner* untuk diameter dan kedalaman, selanjutnya dilakukan penentuan nilai ketidakpastian pengukuran tersebut. Nilai ketidakpastian pengukuran diameter diperoleh dari persamaan (3) sedangkan untuk kedalaman diperoleh dari persamaan (4) :

$$U_{95_MEAS_D_3D} = 2 \cdot u_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{E_{L,MPE}^2}{3} + u_{r,D}^2 + u_{R,D}^2} \quad (3)$$

$$U_{95_MEAS_d_3D} = 2 \cdot u_c = 2 \cdot \sqrt{\frac{E_{L,MPE}^2}{3} + u_{r,d}^2 + u_{R,d}^2} \quad (4)$$

- $U_{95_MEAS_D_3D}$ adalah ketidakpastian gabungan dengan tingkat kepercayaan 95% untuk pengukuran diameter oleh *handheld portable 3D scanner*
- $U_{95_MEAS_d_3D}$ adalah ketidakpastian gabungan dengan tingkat kepercayaan 95% untuk pengukuran kedalaman oleh *handheld portable 3D scanner*
- $PE_{L,MPE}$ adalah *Maximum Permissible Error handheld portable 3D scanner*
- u_r adalah ketidakpastian dari *repeatability of measurement*
- u_R adalah ketidakpastian dari *reproducibility of measurement*

Tabel 9. U_{95} pengukuran diameter oleh *handheld portable 3D scanner*

Kedalaman	$U_{95_3D_diameter}$			
	1 mm	2 mm	4 mm	8 mm
(A) 0.5	0.20	0.10	0.10	0.40
(B) 1	0.22	0.08	0.10	0.09
(C) 2	0.26	0.09	0.08	0.24
(D) 4	0.18	0.09	0.09	0.14

Tabel 10. U_{95} pengukuran kedalaman oleh *handheld 3D scanner*

diameter	$U_{95_3D_kedalaman}$			
	(A) 0.5 mm	(B) 1 mm	(C) 2 mm	(D) 4 mm
1 mm	0.07	0.16	0.67	1.9
2 mm	0.06	0.13	0.67	1.9
4 mm	0.06	0.13	0.66	1.9
8 mm	0.06	0.13	0.66	1.9

Perhitungan Error *Handheld Portable 3D Scanner* terhadap CMM

Setelah mendapatkan hasil pengukuran CMM dan *handheld 3D scanner* dilakukan perhitungan error *handheld 3D scanner* terhadap CMM . Nilai error dimaksud dapat dilihat pada Tabel 11 dan Tabel 12 di bawah ini.

Tabel 11. Error pengukuran diameter (D) *handheld portable 3D scanner* terhadap CMM

kedalaman	Error D (mm)			
	1	2	4	8
(A) 0.5	-	-0.083	-0.097	0.019
(B) 1	-	-0.132	0.008	0.000
(C) 2	-	-0.049	0.067	0.144
(D) 4	-	0.040	-0.042	0.108

Tabel 12. Error pengukuran kedalaman (d) *handheld 3D scanner* terhadap CMM

diameter	Error d (mm)			
	(A) 0.5	(B) 1	(C) 2	(D) 4
1 mm	0.070	0.261	1.351	3.336
2 mm	0.012	0.015	0.086	3.173
4 mm	0.002	0.015	0.026	0.079
8 mm	-0.003	0.003	-0.011	0.005

Pada Tabel 11, nilai error untuk lubang dengan diameter 1 mm tidak ada karena nilai tidak ada nilai referensi sebagaimana penjelasan sebelumnya.

Apabila dibandingkan dengan spesifikasi alat, nilai error pengukuran diameter yang berada di bawah batas akurasi (0.03 mm) yakni lubang dengan dimensi :

- diameter 8 mm dengan kedalaman 0.5, 1 mm
- diameter 4 mm dengan kedalaman 1 mm

Untuk pengukuran kedalaman, nilai error pengukuran kedalaman yang berada di bawah batas akurasi (0.03 mm) yakni lubang dengan dimensi :

- diameter 2 mm dengan kedalaman 0.5, 1 mm
- diameter 4 mm dengan kedalaman 0.5, 1, 2 mm
- diameter 8 mm dengan kedalaman 0.5, 1, 2, 4 mm

Jika nilai error dibandingkan satu sama lain, pada pengukuran kedalaman, (Tabel 12) nilai error terbesar terdapat pada lubang dengan:

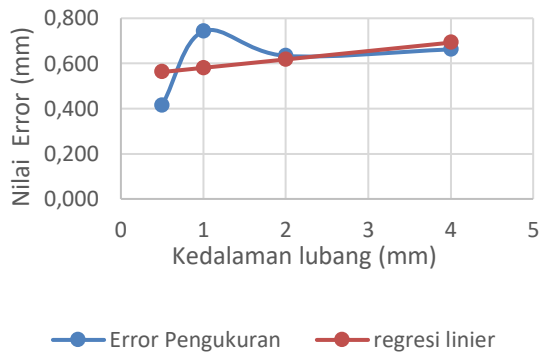
- diameter 1 mm dengan kedalaman 1 mm.
- diameter 1 mm dengan kedalaman 2 mm
- diameter 1 mm dengan kedalaman 4 mm
- diameter 2 mm dengan kedalaman 4 mm

Sedangkan pada diameter 1 mm dengan kedalaman 0.5 mm, *handheld 3D scanner* memberikan hasil error yang relatif besar bila dibandingkan dengan error di kedalaman lain.

Persamaan regresi yang menggambarkan hubungan antara kedalaman lubang dengan error pengukuran *handheld 3D scanner* pada diameter 1 mm adalah:

$$y = 0.037x - 0.54 \quad (5)$$

dimana y adalah error pengukuran *handheld 3D scanner* (mm), x adalah kedalaman lubang (mm)



Gambar 9. Grafik kedalaman lubang vs error hasil pengukuran kedalaman lubang pada diameter 1 mm

Perhitungan En

Selain dibandingkan dengan spesifikasi teknis, untuk mengetahui kinerja *handheld portable 3D scanner* dapat dilakukan melalui nilai En. Nilai En diperoleh melalui formula berikut.

$$E_n = \frac{E_{3D-CMM}}{\sqrt{U_{95,3D}^2 + U_{95,CMM}^2}} \quad (5)$$

dimana

- En adalah *error normalized number*
- E_{3D-CMM} adalah error pengukuran *handheld 3D scanner* terhadap CMM
- $U_{95,3D}^2$ adalah ketidakpastian bentangan pengukuran oleh *handheld 3D scanner* dengan tingkat kepercayaan 95%
- $U_{95,CMM}^2$ adalah ketidakpastian bentangan pengukuran oleh CMM dengan tingkat kepercayaan 95%

Kinerja *handheld 3D scanner* dikatakan “inlier” apabila $-1 < E_n < 1$. Apabila nilai En berada di luar rentang tersebut, kinerjanya dikatakan sebagai “outlier”

Hasil En untuk diameter dan kedalaman dapat dilihat pada Tabel 13 dan Tabel 14 di bawah ini.

Tabel 13. Nilai En pengukuran diameter (D) *handheld 3D scanner* terhadap CMM

kedalaman	En D			
	1	2	4	8
(A) 0.5	-	-0.79	-1.05	0.04
(B) 1	-	-1.54	0.09	0.00
(C) 2	-	-0.45	0.87	0.59
(D) 4	-	0.44	-0.52	0.77

Tabel 14. Nilai En pengukuran kedalaman (d) *handheld portable 3D scanner* terhadap CMM

diameter	En d			
	(A) 0.5	(B) 1	(C) 2	(D) 4
1 mm	1.07	1.64	2.00	1.80
2 mm	0.20	0.11	0.13	1.71
4 mm	0.04	0.12	0.04	0.04
8 mm	-0.06	0.02	-0.02	0.00

Nilai En untuk pengukuran diameter berkategori “outlier” didapat pada lubang dengan dimensi :

- diameter 4 mm, kedalaman 0.5 mm
- diameter 2 mm, kedalaman 1 mm

Nilai En untuk pengukuran kedalaman berkategori “outlier” didapat pada lubang dengan dimensi:

- diameter 1 mm, kedalaman 0.5, 1, 2, 4 mm
- diameter 2 mm, kedalaman 4 mm

IV. PENUTUP

Kesimpulan

Pada studi ini ditemukan bahwa

- *handheld 3D scanner* secara umum memiliki error pengukuran diameter dan pengukuran kedalaman lubang, di atas spesifikasi 0.03 mm
- pada lubang dengan diameter 1 mm, *handheld 3D scanner* memiliki hubungan error pengukuran kedalaman lubang terhadap kedalaman lubang dengan persamaan regresi : $y = 0.037x - 0.54$
- nilai En berkategori “outlier” ditemukan pada lubang berdiameter 1 mm dengan kedalaman 0.5, 1, 2, 4 mm dan lubang berdiameter 2mm dengan kedalaman 4 mm.

Saran

Studi selanjutnya dilakukan identifikasi faktor – faktor yang berkontribusi pada error pengukuran diameter dan kedalaman lubang dengan kinerja terburuk.

Ucapan Terima Kasih

Terimakasih disampaikan kepada

- PT Trimitra Digital Solusi yang telah menyediakan *Handheld Portable 3D Scanner* – AMETEK Creaform, HandySCAN 3D | BLACKSeries untuk digunakan dalam penelitian ini.
- Laboratorium Teknologi Manufaktur dan Otomasi Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia untuk penggunaan stylus CMM.
- Laboratorium Metrologi Politeknik Negeri Jakarta untuk penggunaan CMM dan ragum CNC
- PT Kalpindo untuk penggunaan *gaugeblock*

V. DAFTAR PUSTAKA

- Beraldin, J. Angelo, David MacKinnon and Luc Cournoyer. 2015. “Metrological Characterization of 3D Imaging Systems: Progress Report on Standards Developments”. *17th International Congress of Metrology, CIM 2015* 3: 1–21. <<https://doi.org/10.1051/metrology/20150013003>>.
- Cheng, Yinbao, Zhongyu Wang, Xiaohuai Chen, Yaru Li, Hongyang Li, Hongli Li and Hanbin Wang. 2018. “Evaluation and Optimization of Task-Oriented Measurement Uncertainty for Coordinate Measuring Machines Based on Geometrical Product Specifications”. *Applied Sciences (Switzerland)* 9. <<https://doi.org/10.3390/app9010006>>.
- Emam, S.M., S. Khatibi and K. Khalili. 2014. “Improving the Accuracy of Laser Scanning for 3D Model Reconstruction Using Dithering Technique”. *Procedia Technology* 12: 353–358. <<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.498>>.
- França, João Guilherme D.M., Mário A. Gazziro, Alessandro N. Ide and José H. Saito. 2005. “A 3D Scanning System Based on Laser Triangulation and Variable Field of View”. *Proceedings - International Conference on Image Processing, ICIP* 1: 425–428. <<https://doi.org/10.1109/ICIP.2005.1529778>>.
- Genta, Gianfranco, Paolo Minetola and Giulio Barbato. 2016. “Calibration Procedure for a Laser Triangulation Scanner with Uncertainty Evaluation”. *Optics and Lasers in Engineering* 86: 11–19. <<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.05.005>>.
- Givi, Mehrdad, Luc Cournoyer, Greg Reain and Brian J. Eves. 2019. “Performance Evaluation of a Portable 3D Imaging System”. *Precision Engineering* 59: 156–165. <<https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2019.06.002>>.
- Guidi, G. 2013. “Metrological Characterization of 3D Imaging Devices”. *Videometrics, Range Imaging, and Applications XII; and Automated Visual Inspection* 8791: 87910M. <<https://doi.org/10.1117/12.2021037>>.
- Mendricky, Radomir. 2015. “Analysis of Measurement Accuracy of Contactless 3D Optical Scanners”. *MM Science Journal* 2015: 711–716. <https://doi.org/10.17973/MMSJ.2015_10_201541>.
- Mendricky, Radomir. 2016. “Determination of Measurement Accuracy of Optical 3D Scanners”. *MM Science Journal* 2016: 1565–1572. <https://doi.org/10.17973/MMSJ.2016_12_2016183>.
- Muslimin, M. 2020. “Inspection and Verification of 3D Laser Scanning Datasets Registration for Reverse Engineering Application, Part 1: A Product with Datum”. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, 1–13. <<https://doi.org/10.5013/ijssst.a.20.01.36>>.
- Phillips, Steve, Michael Krystek, Craig Shakarji and Kim Summerhays. 2009. “Dimensional Measurement Traceability of 3D Imaging Data”. *Three-Dimensional Imaging Metrology* 7239: 72390E. <<https://doi.org/10.1117/12.816498>>.
- Polo, María Eugenia and Angel M. Felicísimo. 2012. “Analysis of Uncertainty and Repeatability of a Low-Cost 3D Laser Scanner”. *Sensors (Switzerland)* 12: 9046–9054. <<https://doi.org/10.3390/s120709046>>.
- Takatsuji, Toshiyuki, Sonko Osawa and Osamu Sato. 2008. “Standardization of Noncontact 3D Measurement”. *Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology VI* 7066: 706602. <<https://doi.org/10.1117/12.797968>>.
- Vagovský, Juraj, Ivan Buranský and Augustín Görög. 2015. “Evaluation of Measuring Capability of the Optical 3D Scanner”. *Procedia Engineering* 100: 1198–1206. <<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.484>>.
- Woźniak, A. and M. Dobosz. 2003. “Metrological Feasibilities of CMM Touch Trigger Probes. Part I: 3D Theoretical Model of Probe Pretravel”. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 34: 273–286. <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2003.05.001>>.