

## Design of Calibration Framework for Motionable and Portable Optical-Based Motion Recorder

Ferryanto<sup>1</sup>, Mega Pradipta<sup>1</sup>, Indria Herman<sup>1</sup>, Sandro Mihradi<sup>1</sup>, Tatacipta Dirgantara<sup>2</sup>  
dan Andi Isra Mahyuddin<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Kelompok Keahlian Perancangan Mesin, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara,

<sup>2</sup>Kelompok Keahlian Struktur Ringan, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara,

Institut Teknologi Bandung - Bandung

\*Korespondensi: aim@ftmd.itb.ac.id

**Abstract.** Nowadays, gait analysis has been often applied in medical, sport, visual animation and design product application. Gait analysis could be measured by an optical motion capture system. This paper presents the further improvement of the optical motion analyzer developed by Biomechanics Research Team in ITB. One of the drawback of the previous motion analyzer system was the system could be only used in the laboratory due to large size of calibration frame. Therefore, the purpose of the present work is to design the calibration frame so that the motion analyzer could be portable without sacrificing its accuracy. The first step in this research is to evaluate the calibration frame used in the previous motion analyzer system. Then, the design requirement and objective (DR&O) of the calibration frame is established. The DR&O is then used to determine the alternative design and finally the detail design. To analyze the assembling efficiency of calibration frame, the Design for Assembly (DFA) analysis is applied. The next step is the manufacture of the frame based of the material and dimension in the detail design. The final design of the calibration frame is the aluminum frame with dimension 1.5 x 1.5 x 0.5 meter and consists of 64 links and 32 joints. The joints are also used as the location of the marker placement. The links are connected to the joints by a Locational Transition Fits, i.e. H7 – n6. With this design, the motion analyzer system could be portable because the calibration frame could be disassembled into the small components. In addition, the assemble of the calibration frame is simple.

**Abstrak.** Pada saat ini, analisis gerak berjalan telah banyak diterapkan pada bidang medis, olahraga, animasi visual, maupun perancangan produk. Gerak berjalan dapat diukur dengan menggunakan sistem perekam gerak berbasis optik (optical motion capture system). Makalah ini membahas rancangan lanjut sistem perekam gerakan. Tim riset biomekanika di ITB telah mengembangkan sistem berbasis optik yang dapat menangkap gerakan. Namun, sistem tersebut hanya bisa dipakai di laboratorium karena kerangka kalibrasi yang relatif besar. Oleh sebab itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang kerangka kalibrasi kamera sehingga *optical motion capture* sistem menjadi portabel dengan mempertahankan akurasi yang tinggi. Tahap pertama penelitian ini adalah evaluasi kerangka kalibrasi yang digunakan sampai saat ini. Setelah itu, design requirement dan objective (DR & O) kerangka kalibrasi disusun. Tahap berikutnya adalah menentukan alternatif rancangan berdasarkan DR & O yang telah disusun dan dilanjutkan dengan rancangan detail. Analisis Design for Assembly (DFA) juga dilakukan untuk menjamin pemasangan kerangka kalibrasi yang efisien. Proses selanjutnya adalah membuat kerangka kalibrasi berdasarkan dimensi dan material yang ada dalam rancangan akhir. Hasil perancangan akhir kerangka kalibrasi dalam penelitian ini adalah berupa rangka aluminium dengan dimensi 1,5 x 1,5 x 0,5 meter yang terdiri dari 64 batang dan 32 joint yang digunakan sebagai tempat penempatan marker. Batang disambungkan dengan joint menggunakan suaiian Locational Transition Fits yaitu H7 – n6. Dengan kerangka kalibrasi demikian, optical motion capture system bisa menjadi portabel karena kerangka kalibrasi bisa dilepas menjadi komponen kecil dan mudah dipasang kembali.

**Kata kunci:** optical motion capture system, kerangka kalibrasi, kalibrasi kamera, perancangan, portabel

© 2017. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

### Pendahuluan

Analisis gerak berjalan manusia telah diterapkan dalam berbagai macam bidang, dari mulai bidang olahraga, medis, animasi visual, maupun perancangan produk. Dalam bidang medis, analisis gerak berjalan dapat digunakan untuk membeda-

kan pola gerak berjalan manusia normal dengan yang memiliki ketidaknormalan seperti memiliki kelainan tulang, penyakit syaraf, penyakit otot, maupun orang yang harus menggunakan kaki palsu. Dengan menggunakan analisis gait, dapat dibandingkan parameter gait yang dimiliki seseorang

dengan parameter yang ada pada basis data gerak berjalan orang normal. Saat ini sudah didapat basis data sampel gait orang Indonesia oleh Tim Riset Biomekanika Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung (FTMD ITB) yang sudah dikembangkan dari tahun 2008 hingga 2017 [1-4].

Dalam bidang kedokteran khususnya proses rehabilitasi medik, analisis gerak berjalan sebaiknya dilakukan secara bertahap dan rutin dalam jangka waktu tertentu sehingga lebih menggambarkan kondisi subjek sehari-hari dan dapat dilihat perkembangan dan hasil dari proses rehabilitasi pasien. Oleh karena itu, jika proses pengambilan data hanya dapat dilakukan di laboratorium tertentu maka akan mempersulit proses pengambilan data yang dilakukan secara rutin. Beberapa faktor yang dapat mempersulit proses pengambilan data tersebut dapat diperoleh dari keterbatasan waktu pengambilan data dan besarnya biaya yang diperlukan untuk melakukan pengambilan dan pengolahan data gait [5].

Pengambilan data gait yang dilakukan oleh tim riset Biomekanika ITB saat ini bisa dilakukan dengan baik menggunakan optical motion capture system yang ada di ruang pengambilan data Laboratorium Biomekanika ITB. Namun, sistem tersebut akan sulit untuk dijadikan sistem yang portabel sehingga diperlukan pengembangan sistem yang dapat dilakukan di tempat yang terjangkau oleh subjek untuk dapat membantu proses rehabilitasi subjek. Berbagai peralatan baik itu perangkat keras maupun perangkat lunak yang ada pada sistem pengambilan data analisis gerak berjalan yang saat ini telah dipakai di Laboratorium Biomekanik FTMD perlu dikembangkan untuk dapat mendukung proses ini.

Oleh sebab itu, penelitian dalam makalah ini bertujuan untuk mengembangkan optical motion capture system yang cermat dan portabel sehingga dapat dilakukan dimana saja dengan waktu pemasangan yang cepat, proses yang mudah, serta tetap akurat dan dapat dipertanggungjawabkan hasilnya.

## Metode Penelitian

Tahap pertama dalam merancang sistem kalibrasi kamera sehingga optical motion capture system menjadi portabel dengan mempertahankan akurasi yang tinggi adalah evaluasi sistem kalibrasi kamera yang telah dikembangkan sebelumnya. Salah satu masalah yang terdapat pada kerangka kalibrasi sebelumnya adalah besarnya ukuran kerangka kalibrasi dan susah dilepas sehingga tidak mendukung sistem analisis gerak yang portabel (lihat gambar 1). Desain rangka kalibrasi harus mempertimbangkan waktu perakitan. Dengan tu-

juan membuat rangka kalibrasi yang portabel diperlukan waktu *assembly* dan *disassembly* yang cepat. Selain itu, marker kalibrasi juga perlu dikembangkan dan dibuat agar memiliki bentuk dan ukuran yang sama sehingga memudahkan proses pengambilan data kalibrasi. Marker LED yang dipakai pada sistem analisis gerak sebelumnya ditunjukkan oleh gambar 2.



**Gambar 1.** Kerangka kalibrasi pada sistem analisis gerak sebelumnya



**Gambar 2.** Marker LED yang dipakai pada sistem analisis gerak sebelumnya

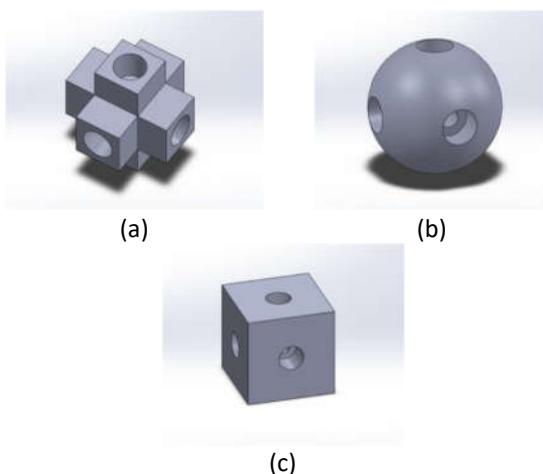
Hasil evaluasi pada sistem kalibrasi kamera sebelumnya kemudian digunakan untuk menyusun Design Requirement & Objectives (DR&O) kerangka kalibrasi yang akan dirancang dalam penelitian ini. Tabel 1 menunjukkan daftar kebutuhan rangka kalibrasi ruang yang disajikan dalam kriteria biaya, karakteristik, pembuatan, dan maintainability.

**Tabel 1.** DR&O kerangka kalibrasi ruang

No	Kriteria	Kebutuhan	Demand/Wish
1	Biaya	Biaya pembuatan produk murah	Wish
2	Karakteristik	Berat rangka ringan	Demand
		Posisi Marker tepat dan akurat	Demand
		Memiliki tempat peletakan marker kalibrasi	Demand
		Sulit berubah bentuk/ukuran	Demand
		Mudah dalam perakitan	Demand
		Cepat dalam perakitan	Demand
		Dimensi Packaging Kecil	Demand
		Kekakuan Rangka Assembly Tinggi	Demand
3	Pembuatan	Pembuatan mudah	Wish
		Jumlah komponen sedikit	Demand
4	Maintainability	Perawatan Mudah	Wish
		Durability Tinggi	Wish

Tahap berikutnya dari penentuan DR&O kerangka kalibrasi adalah menentukan alternatif solusi

dalam beberapa aspek, yaitu material batang dan sambungan kalibrasi, desain dan prinsip kerja rangka, bentuk sambungan rangka, metode penyambungan rangka, dan sumber daya marker kalibrasi ruang. Ada tiga jenis material yang bisa digunakan untuk batang dan sambungan batang kalibrasi, yaitu aluminum, polimer PEEK, dan stainless steel. Desain dan prinsip kerja rangka bisa berupa modular dan expandable. Desain modular adalah desain dimana seluruh komponen penyusun rangka kalibrasi dapat dilepas menjadi komponen-komponen tersendiri yang memiliki sifat mampu tukar. Sementara itu, desain expandable adalah desain kerangka kalibrasi yang bisa mengembang menjadi ukuran tertentu saat digunakan dan mengecil jika sedang tidak digunakan. Bentuk sambungan rangka juga bisa berbentuk sambungan berlengan, bola, dan kotak seperti yang ditunjukkan oleh gambar 3. Batang dalam rangka kalibrasi bisa disambung dengan menggunakan pasak baut, penguncian suaian, atau menggunakan bentuk ulir. Alternatif dalam sumber daya adalah sumber daya terpisah dan terpusat.



**Gambar 3.** Alternatif bentuk sambungan rangka: (a) sambungan berlengan, (b) sambungan bola, dan (c) sambungan kotak

Berdasarkan beberapa alternatif yang ditemukan di atas, diperoleh 108 kombinasi yang dapat dipilih sebagai solusi terbaik. Untuk mempersingkat proses analisis pemilihan solusi tersebut, dilakukan eliminasi pada beberapa aspek yang menghasilkan alternatif-alternatif tersebut. Untuk material batang dan sambungan kalibrasi, material polimer PEEK tidak dipilih karena sulit mencari bahan baku yang tersedia di Indonesia, sementara itu material aluminium dipilih karena memiliki dua sifat yang lebih menguntungkan dari stainless steel yakni massa jenis yang lebih ringan dan harga yang lebih murah.

Selanjutnya untuk alternatif desain dan cara kerja yang ditemukan, dipilih desain modular

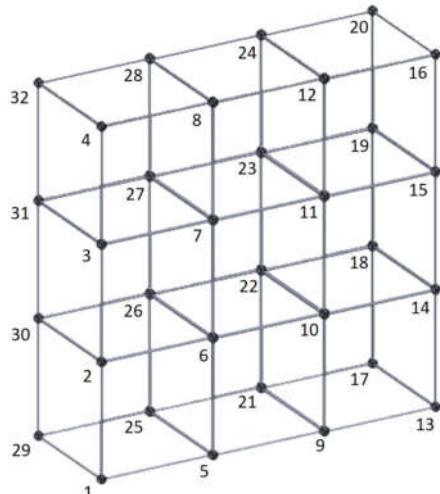
karena desain modular dapat lebih mudah untuk dikembangkan dan di sesuaikan untuk berbagai kebutuhan metode kalibrasi ruang nantinya. Bentuk sambungan berlengan juga tidak dipilih karena bentuk tersebut menyebabkan kesulitan proses produksi serta tidak menghasilkan kelebihan tertentu dibanding bentuk sambungan kotak dan bola. Sistem marker kalibrasi ruang yang dipilih adalah sistem dengan sumber daya terpisah karena memungkinkan pengembangan metode kalibrasi ruang nantinya dan mempermudah proses pemasangan pada rangka kalibrasi yang portabel.

Kemudian, setiap kombinasi alternatif solusi yang tersisa akan dievaluasi dengan menggunakan metode *relative comparison* [6]. Metode *relative comparison* merupakan salah satu metode pengambilan keputusan dengan cara membandingkan salah satu alternatif solusi dengan alternatif solusi lainnya. Metode *relative comparison* berisi beberapa kriteria kebutuhan yang dimiliki oleh suatu desain. Kriteria tersebut akan diberi suatu faktor pengali atau biasa disebut *weighting factor*. Semakin penting kriteria tersebut, semakin tinggi nilai *weighting factor* yang diberikan. *Weighting factor* akan dikalikan dengan nilai kriteria dari setiap solusi. Dalam menentukan *weighting factor* dari tiap-tiap kriteria tersebut, dilakukan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP), yakni metode pengambilan keputusan dari beberapa alternatif dengan melakukan perbandingan relatif dari beberapa pilihan kriteria baik itu terdiri dari perbandingan kuantitatif maupun kualitatif [6]. Dalam penelitian, kriteria yang digunakan dalam analisis pengambilan keputusan adalah harga, berat, ketelitian, kemudahan perakitam, waktu perakitan, *portability*, dan *durability* dari kerangka kalibrasi yang akan dirancang.

Metode *relative comparison* menghasilkan kombinasi desain terpilih yaitu aluminium sebagai material batang, desain dan cara kerja rangka berbentuk modular, sambungan berupa kotak, metode penyambungan menggunakan sistem suaian, dan sumber daya marker yang dipilih adalah sumber daya terpisah.

Langkah berikutnya dalam perancangan kerangka kalibrasi adalah penentuan dimensi rangka kalibrasi. Penentuan kerangka kalibrasi berdasarkan kebutuhan ruang kalibrasi kamra, yaitu  $0,5 \times 0,5 \times 1$  meter. Jarak antar marker yang membentuk titik kontrol ditentukan untuk memudahkan proses perhitungan yang dilakukan untuk memperoleh parameter kamera. Jika jarak antar marker yang dipilih terlalu besar, akan diperoleh parameter perhitungan yang lebih sedikit jumlahnya karena jumlah titik kontrol yang berkurang. Sementara itu, jika jarak antar marker terlalu kecil akan dibutuhkan

jumlah marker yang terlalu banyak. Maka dari itu, dipilih jarak antar marker sebesar 0,5 meter sehingga didapat cukup banyak titik kontrol untuk dapat menghasilkan perhitungan yang akurat. Batang kalibrasi digunakan sebagai penghubung tiap-tiap sambungan harus menghasilkan jarak antar sambungan yang konsisten. Untuk memperoleh dimensi ruang pengambilan sebesar  $1,5 \times 1,5 \times 0,5$  meter, diperlukan 32 marker yang membentuk kubus  $3 \times 3$  seperti ditunjukkan pada gambar 4.



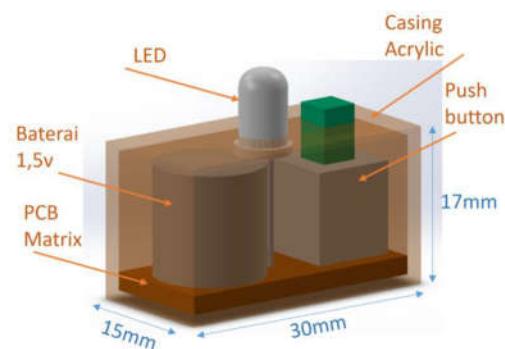
**Gambar 4.** Konfigurasi rangka kalibrasi 32 marker yang membentuk ruang pengambilan  $1,5 \times 1,5 \times 0,5$  meter

Jarak antar marker yang ditempatkan pada sambungan kalibrasi ialah 0,5 meter, sehingga panjang batang kalibrasi yang dipilih yakni 490 mm dan dimensi sambungan yaitu  $50 \times 50 \times 50$  mm. Dimensi tersebut dipilih supaya terdapat ruang didalam lubang sambungan saat batang kalibrasi dipasang dari setiap sisi. Diameter batang kalibrasi dipilih berdasarkan pada kebutuhan rangka kalibrasi portable sehingga diperlukan batang kalibrasi yang ringan yang berarti dibutuhkan diameter yang kecil namun masih mungkin dilakukan proses pemesinan sederhana dan diperoleh material awal yang ada di pasaran adalah batang kalibrasi dengan diameter  $0,5"$ . Ujung batang kalibrasi kemudian diperkecil menjadi ukuran 8mm sesuai dengan ruang yang tersedia pada kotak sambungan yang terpasang marker kalibrasi.

Batang kalibrasi dihubungkan ke sambungan dengan menggunakan sistem suaian. Dalam perancangan ini, sistem yang dipilih ialah sistem basis lubang, karena pada kasus kali ini, ukuran lubang yang dibuat akan mengikuti ukuran mata pahat standar dan diameter luar dari ujung batang dapat dikurangi selama proses pembuatan. Kelas suaian yang dipilih adalah kelas suaian Locational Transition Fits (LT) dari kelompok suaian pas, sehingga diperoleh jenis suaian yang dipilih adalah

H7-n6. Pemilihan ini dilakukan berdasar pada tujuan penggunaan kelas suaian LT, yakni masih mementingkan akurasi dari posisi komponen saat sudah dipasang, kekakuan sambungan setelah dipasang, dan proses pemasangan yang dilakukan secara manual tanpa bantuan alat [7]. Dari jenis suaian yang dipilih, dapat dilihat jika dalam kondisi kelonggaran minimum yaitu saat ukuran poros maksimum 8,02 mm dan ukuran lubang minimum 8,00 mm akan terjadi interference. Ujung batang kalibrasi harus dapat mengecil untuk dapat memenuhi kondisi tersebut. Karena material yang digunakan pada batang dan sambungan kalibrasi sama yakni aluminium, perlu dilakukan modifikasi pada bentuk ujung batang untuk mengubah kekakuan ujung batang tersebut. Perubahan bentuk ujung batang yang dipilih adalah pembuatan segmentasi ujung batang kalibrasi sehingga terdapat celah agar ujung batang dapat mengecil.

Selain kerangka kalibrasi, marker LED yang digunakan dalam sistem analisis gerak juga didesain ulang sehingga semua marker mempunyai ukuran yang sama. Dengan mempertimbangkan dimensi komponen-komponen penyusun marker yang tersedia di pasaran dan bentuk susunan rangkaian untuk menghasilkan ukuran terkecil, marker kalibrasi dibuat dengan kotak akrilik dengan dimensi  $30 \times 15 \times 17$  mm yang dimodelkan pada gambar 5. Dari ukuran marker yang telah ditentukan berikutnya dapat ditentukan dimensi sambungan rangka kalibrasi yang harus memiliki salah satu fungsi sebagai tempat meletakkan marker kalibrasi.



**Gambar 5.** Model marker kalibrasi ruang standar

Analisis Design for Assembly (DFA) juga diterapkan untuk mengevaluasi tingkat kesulitan proses perakitan kerangka kalibrasi. Metode yang digunakan dalam analisis DFA ini, yaitu metode Boothroyd & Dewhurst [8]. Untuk mengetahui efisiensi perakitan kerangka kalibrasi, DFA index dihitung dengan menggunakan jumlah komponen esensial dan waktu yang dibutuhkan untuk merakit seluruh komponen. Kerangka kalibrasi yang dirancang dalam penelitian ini memiliki 32 komponen esensial dan membutuhkan waktu perakitan 710.08

detik sehingga DFA index yang diperoleh adalah 13,52%. Jumlah ini sudah berada di atas DFA Index produk rata-rata menurut Boothroyd [8] yaitu sebesar 10% hingga 11%.

Langkah berikutnya adalah proses pembuatan kerangka kalibrasi. Sambungan kalibrasi dibuat dengan menggunakan material awal yaitu kotak aluminium berukuran 5 x 5 x 5 cm. Pada pembuatan sambungan rangka kalibrasi, dibutuhkan juga fixture untuk membantu proses pelubangan sambungan batang kalibrasi. Pelubangan dilakukan dengan menggunakan mesin gurdi.

Batang kalibrasi diproduksi dari material awal berupa tatakan silinder aluminium pejal dengan ukuran diameter 0,5" dan panjang 1 meter. Proses pembuatan diawali dengan memotong material dasar dari batang silinder aluminium menjadi ukuran 49 cm. Kemudian dilakukan proses pencucian diameter batang kalibrasi menjadi 8 mm pada ujung batang dengan mesin bubut. Proses selanjutnya adalah pembuatan chamfer pada ujung batang yang telah diperkecil diameternya. Pembuatan chamfer ini dilakukan supaya saat perakitan, proses insertion tidak mengalami hambatan tambahan. Lalu, dilakukan pemotongan untuk membentuk segmentasi pada kedua ujung batang dengan menggunakan alat gergaji potong.

## Hasil dan Pembahasan

Untuk mengevaluasi hasil proses produksi pada sambungan dan batang kalibrasi, dilakukan pengujian yang dapat mengetahui informasi ukuran dari dimensi-dimensi penting pada komponen tersebut. Pengukuran dimensi diukur dengan menggunakan alat Coordinate Measuring Machine (CMM). Alat CMM yang dipakai adalah CMM Mitutoyo jenis Crysta-Apex S dengan kecermatan 1,9  $\mu\text{m}$  dan rentang pengukuran pada temperature 19-21°C.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa dimensi panjang sisi semua komponen sambungan kalibrasi memenuhi toleransi yang telah ditentukan di desain awal yakni  $\pm 0,9$  mm. Sementara untuk lubang yang dibuat menghasilkan diameter lubang yang ukurannya berada di luar batas toleransi maksimal yakni 8,02 mm pada sebagian besar komponennya. Hal ini disebabkan oleh proses produksi yang dilakukan kurang baik, karena saat proses perataan secara manual untuk permukaan dua sisi kotak yang dipotong didapat permukaan yang tidak siku sehingga menghasilkan sudut yang berbeda saat pelubangan.

Diameter lubang pada sambungan batang kalibrasi yang di luar toleransi menyebabkan jenis suaian yang tidak diharapkan. Oleh sebab itu, pemasangan kerangka kalibrasi memerlukan tenaga

yang cukup kuat. Namun, seluruh komponen penyusun rangka kalibrasi dapat dirakit dan dapat memberikan posisi marker yang akurat seperti yang terlihat pada gambar 6.



Gambar 6. Hasil kerangka kalibrasi menggunakan rancangan dalam penelitian ini

## Kesimpulan

Makalah ini menyajikan proses perancangan kerangka kalibrasi untuk mendukung pengembangan sistem analisis gerakan berjalan manusia yang portabel dan cermat. Hasil perancangan akhir kerangka kalibrasi dalam penelitian ini adalah berupa rangka aluminium dengan dimensi 1,5 x 1,5 x 0,5 meter yang terdiri dari 64 batang dan 32 joint yang digunakan sebagai tempat penempatan marker. Batang disambungkan dengan joint menggunakan suaian Locational Transition Fits yaitu H7 – n6.

## Referensi

- [1] Juliyad, N., Mihradi, S., Dirgantara, T., & Mahyuddin, A. I. (2010). 2D Observational Optical Motion System for Analysis of Human Gait. In Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology, Bali, 2010.
- [2] Dirgantara, T., Mahyuddin, A. I., & Mihradi, S. (2012). Development of Affordable Optical Based Gait Analysis Systems. ASEAN Engineering Journal, 2(1), 12-29.
- [3] Mihradi, S., Ferryanto, Dirgantara, T., & Mahyuddin, A. I. (2013). Tracking of Markers for 2D and 3D gait analysis using home video cameras. International Journal of E-Health and

Medical Communications (IJEHMC), 4(3), 36-52.

- [4] Mihradi, S., Ferryanto, Dirgantara, T., & Mahyuddin, A. I. (2011, November). Development of an optical motion-capture system for 3D gait analysis. In Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME), 2011 2nd International Conference on (pp. 391-394). IEEE.
- [5] Sheldon R. Simon, Quantification of human motion: gait analysis benefits and limitations to its application to clinical problem, Journal of Biomechanics Vol.37 Issue 12, 2004
- [6] G. E. Dieter, Engineering Design 4th, New York: McGraw-Hill, 2009.
- [7] Coban Engineering, (2017, March 6). Tolerancing and Engineering Standards. Di akses dari COBANENGINEERING: <http://www.cobanengineering.com/Tolerances/TolerancesDefinitions.asp>
- [8] G. Boothroyd, Assembly Automation and Product Design 2nd edition, New York: Taylor & Francis Group, 2