

Optimasi Kinerja Jaringan *Hybrid* Berbasis *Free-Space Optics* dan *Next-Generation Passive Optical Network* dengan Pemantauan *Internet of Things* pada Kawasan Batununggal Bandung

1st M. Fachrul Islam Rakhman
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

fachrulislam@student.telkomuniversity
.ac.id

2nd Rina Pudji Astuti
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

rinapudjiastuti@telkomuniversity.ac.id

3rd Akhmad Hambali
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom Bandung,
Indonesia

ahambali@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Kebutuhan akan internet berkecepatan tinggi di kawasan urban seperti Batununggal Bandung mendorong pengembangan jaringan akses yang efisien. Namun, peraturan yang melarang kabel udara serta keterbatasan lahan menjadi hambatan utama dalam penggelaran jaringan optik konvensional. Penelitian ini mengusulkan solusi berupa jaringan akses *hybrid* yang menggabungkan *Free-Space Optics* (FSO) sebagai jalur *feeder* dan *Next-Generation Passive Optical Network* (NG-PON) sebagai jalur distribusi, dilengkapi sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) dan *auto-tracking* berbasis kamera-servo. Metode yang digunakan mencakup perancangan sistem, simulasi performansi menggunakan *software* optik, dan pengujian perangkat keras secara langsung. Hasilnya, sistem mencatat nilai *Link Power Budget* antara -25,196 hingga -25,704 dBm, BER $6,89 \times 10^{-9}$ hingga $2,95 \times 10^{-7}$, SNR mencapai 60 dB, dan *Q-Factor* 4,99–5,58. Selain itu, sistem ini menurunkan biaya per *homepass* hingga 25% dibandingkan G-PON, serta mampu memantau kondisi lingkungan secara *real-time* melalui *dashboard* Skylink. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem ini layak diterapkan sebagai alternatif jaringan akses yang efisien dan adaptif.

Kata kunci— FSO, NG-PON, IOT, jaringan hybrid, skylink

I. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan akan internet berkecepatan tinggi di kawasan urban menuntut penyedia layanan untuk mengembangkan jaringan akses yang tidak hanya cepat, tetapi juga efisien dan sesuai regulasi. Di wilayah Batununggal, Bandung, penggelaran jaringan konvensional terhambat oleh Peraturan Wali Kota Bandung No. 589 Tahun 2013 yang melarang penggunaan kabel udara di ruang publik [1]. Hal ini menyulitkan pengembangan jalur optik *feeder* secara fisik, khususnya oleh operator seperti Unifiber by Asiantet yang masih menggunakan teknologi G-PON dengan keterbatasan efisiensi dan kapasitas. Selain itu, belum adanya sistem pemantauan *real-time* berbasis kondisi lingkungan menambah kompleksitas pengelolaan jaringan.

Sebagai solusi, penelitian ini mengusulkan perancangan jaringan akses *hybrid* yang menggabungkan teknologi *Free-*

Space Optics (FSO) untuk jalur *feeder* dan *Next-Generation Passive Optical Network* (NG-PON) untuk jalur distribusi. Sistem ini juga dilengkapi dengan pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan sensor suhu, kelembapan, debu, getaran, dan curah hujan yang terintegrasi dengan *platform* visualisasi berbasis web. Untuk menjaga kestabilan sinyal FSO, diterapkan pula sistem *auto-tracking* berbasis kamera dan servo. Efektivitas sistem diuji melalui simulasi performansi berdasarkan parameter *Link Power Budget* (LPB), *Bit Error Rate* (BER), *Signal to Noise Ratio* (SNR), dan *Q-Factor*, guna memastikan bahwa sistem dapat bekerja secara optimal dalam berbagai kondisi lingkungan serta mengurangi biaya penggelaran jaringan.

II. KAJIAN TEORI

Penelitian ini mencakup dasar-dasar dari masing-masing teknologi utama yang digunakan dalam sistem, yaitu FSO, NG-PON, IoT, sistem pelacakan otomatis (*auto-tracking*), serta parameter dan regulasi teknis yang menjadi acuan dalam proses perancangan dan evaluasi. Setiap komponen dijelaskan secara terpisah agar memberikan pemahaman menyeluruh terhadap arsitektur sistem yang dibangun.

A. Teknologi Jaringan *Hybrid*

Free-Space Optics (FSO) adalah teknologi komunikasi optik nirkabel yang mentransmisikan data melalui udara, cocok untuk wilayah dengan keterbatasan jalur fisik. NG-PON merupakan pengembangan dari G-PON yang memiliki kapasitas dan efisiensi distribusi lebih tinggi. Integrasi keduanya membentuk jaringan *hybrid* yang fleksibel dan hemat biaya [2].

B. IoT Monitoring

IoT digunakan untuk memantau kondisi lingkungan secara *real-time* menggunakan sensor suhu, kelembapan, debu, getaran, dan curah hujan. Data dikirim ke Supabase melalui ESP8266 dan divisualisasikan di *dashboard* Skylink. Sistem ini memungkinkan respons cepat terhadap gangguan eksternal [3].

C. Parameter Performansi

Empat parameter utama digunakan untuk mengevaluasi sistem: Link Power Budget (> -28 dBm) [4], *Bit Error Rate* ($< 10^{-6}$) [7], *Signal to Noise Ratio* ($> 21,5$ dB) [5], dan *Q-Factor* (mendekati 6) [6]. Nilai-nilai ini menunjukkan apakah sistem mampu beroperasi stabil dan efisien.

D. Sistem *Auto-Tracking*

Auto-tracking digunakan untuk menjaga sinyal FSO tetap pada jalurnya menggunakan kamera dan motor servo. Sistem dikendalikan secara otomatis melalui algoritma Python dan OpenCV, yang menyesuaikan posisi pancaran jika terjadi pergeseran akibat getaran atau kondisi cuaca [8].

E. Regulasi

Peraturan Wali Kota Bandung No. 589 Tahun 2013 melarang penggunaan kabel udara di ruang publik. Oleh karena itu, pendekatan FSO digunakan untuk mematuhi regulasi tanpa mengorbankan kualitas jaringan [1].

III. METODE

Penelitian ini mencakup proses perancangan sistem jaringan *hybrid*, konfigurasi perangkat keras IoT dan *auto-tracking*, serta tahapan pengujian performansi berdasarkan kondisi simulasi.

A. Perancangan Jaringan *Hybrid*

Desain jaringan dilakukan berdasarkan peta wilayah Batununggal dengan mempertimbangkan titik POP (Point of Presence) di Ciwastra. Jalur *feeder* menggunakan FSO untuk menjangkau area yang tidak memungkinkan penggalian kabel, sementara distribusi ke pelanggan dilakukan menggunakan NG-PON. Rancangan topologi menggunakan *AutoCAD* untuk menentukan posisi ONT dan ODP yang efisien.

B. Rancang Bangun Sistem IoT dan *Auto-Tracking*

Komponen sistem IoT terdiri dari ESP8266, Arduino UNO, dan lima jenis sensor (BME280, SW-420, GP2Y1010AU0F, dan Hall Effect A3114). Data dikirim ke Supabase dan divisualisasikan melalui antarmuka Skylink berbasis web. Sistem *auto-tracking* dilengkapi dengan kamera dan dua motor servo MG90s untuk mengoreksi arah pancaran laser. Pemrosesan citra dilakukan menggunakan OpenCV dengan deteksi pusat target secara *real-time*.

C. Simulasi dan Pengujian

Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan kondisi cuaca cerah, hujan ringan, hujan lebat, dan kabut untuk mengetahui sensitivitas sistem FSO. Parameter LPB, BER, SNR, dan *Q-Factor* diukur untuk setiap kondisi dan jarak. Hasilnya digunakan untuk menilai kestabilan dan efisiensi sistem dalam berbagai skenario lingkungan.

D. Pendekatan Perhitungan

Pengujian Evaluasi parameter dilakukan dengan dua pendekatan: manual dan simulasi *software*. Perhitungan manual menggunakan rumus-rumus berikut:

a) Link Power Budget

$$P_{Rx} = P_{Tx} - \text{Total loss} \quad (1)$$

b) Signal to Noise Ratio

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{\text{Signal}}}{P_{\text{Noise}}} \right) \quad (2)$$

c) Q-Factor

$$Q = \frac{10 \frac{\text{SNR}}{20}}{2} \quad (3)$$

d) Bit Error Rate

$$\text{BER} = \frac{\text{EXP} \left(\frac{-Q^2}{2} \right)}{Q\sqrt{2\pi}} \quad (4)$$

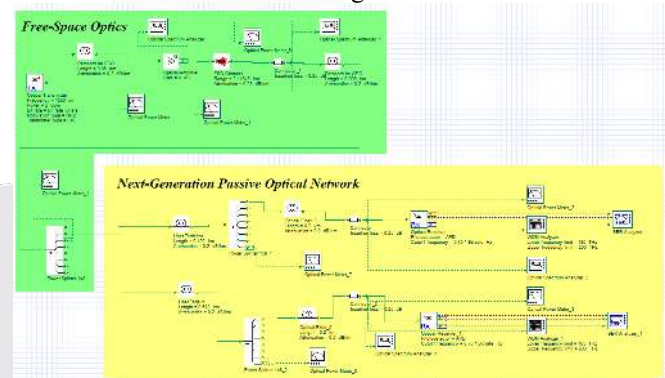
E. Visualisasi dan Evaluasi Kinerja

Dashboard Skylink memberikan tampilan grafik kondisi lingkungan dan status jaringan. Sistem juga mengirimkan notifikasi otomatis saat terjadi gangguan. Data yang terkumpul dievaluasi untuk membandingkan performansi teknis dan efisiensi biaya antara jaringan G-PON konvensional dan desain *hybrid* yang diusulkan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menjelaskan hasil implementasi dan pengujian sistem berdasarkan empat kategori utama, yaitu performansi teknis jaringan, efisiensi biaya pengeluaran, respons sensor IoT, dan pengujian fitur *auto-tracking*. Masing-masing dibahas secara sistematis berikut ini.

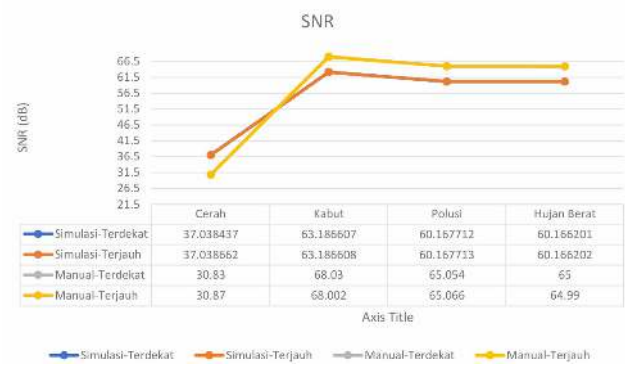
A. Hasil Simulasi dan Perhitungan Manual



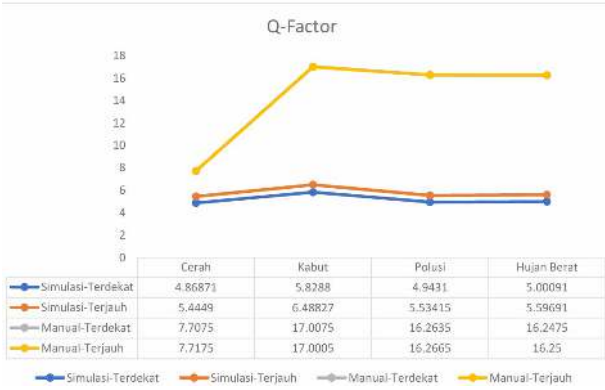
GAMBAR 1

Simulasi Kelayakan *Software Simulator* Optik

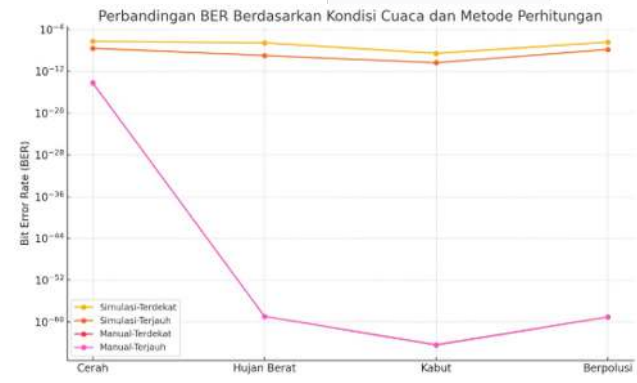
Hasil pengujian parameter teknis dilakukan melalui simulasi perangkat lunak dan perhitungan manual. Tabel berikut merangkum hasil LPB, SNR, *Q-Factor*, dan BER dari kedua pendekatan tersebut, serta batas ideal yang dijadikan acuan kinerja sistem.



GAMBAR 2
Grafik Perbandingan SNR



GAMBAR 3
Grafik Perbandingan Q-Factor



GAMBAR 4
Grafik Perbandingan BER

TABEL 1 REKAPITULASI HASIL PENGUJIAN TEKNIS				
Parameter	Hasil Simulasi	Hasil Manual	Ambang Ideal	Keterangan
LPB	-25,2 s.d. -25,7 dBm	-21,3 dBm (rerata)	> -28 dBm	Simulasi realistis, manual lebih idealis
SNR	37 – 60 dB	Hingga 68 dB	> 21,5 dB	Sangat baik di semua kondisi
Q-Factor	4,99 – 5,58	> 6 (hingga >17)	≥ 6	Masih dalam batas toleransi
BER	10 ⁻⁶ – 7 – 10 ⁻¹¹	Hingga 10 ⁻⁶⁵	< 10 ⁻⁶	Layak secara teknis

Nilai LPB pada simulasi selalu di atas ambang batas -28 dBm, menandakan penerimaan sinyal tetap optimal. SNR sangat tinggi di seluruh skenario uji, menunjukkan noise sangat minim. *Q-Factor* sedikit di bawah ideal namun masih dalam batas toleransi. Nilai BER juga sangat kecil, menandakan kesalahan bit yang sangat rendah.

B. Evaluasi Efisiensi Biaya Penggelaran

Biaya penggelaran jaringan dibandingkan antara sistem *hybrid* FSO-NG-PON dan sistem konvensional G-PON. Hasil perhitungan menunjukkan efisiensi signifikan.

TABEL 2
EFISIENSI BIAYA SISTEM

Jenis Sistem	Jumlah Homepass	Biaya Total	Biaya per Homepass	Efisiensi
G-PON	3.000	Rp726.564.000	Rp242.188	-
Iybrid	6.000	Rp1.044.732.000	Rp174.122	Lebih hemat 25%

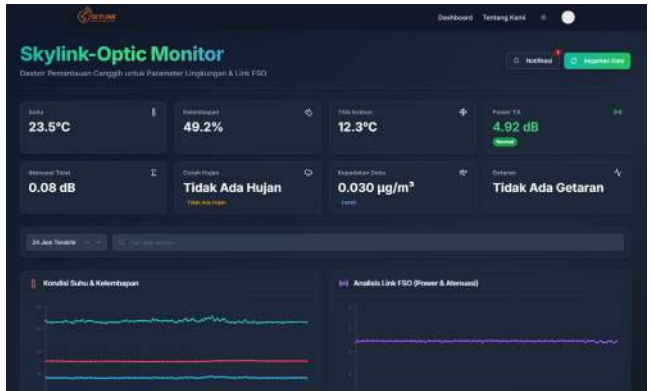
Sistem *hybrid* mampu menurunkan biaya hingga 25% per homepass meskipun dengan jangkauan dua kali lipat lebih banyak dari sistem konvensional.

C. Pengujian dan Respon Sistem IoT

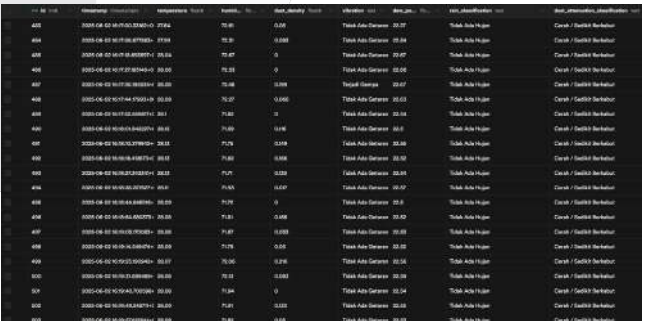
Sistem IoT diuji menggunakan berbagai sensor lingkungan yang dikendalikan oleh mikrokontroler dan terhubung ke dashboard Skylink. Sensor memberikan notifikasi ketika nilai melebihi ambang.

TABEL 3
RESPON SENSOR IOT

Jenis Sensor	Fungsi	Respon Sistem
Sensor Hujan Custom A3114	Curah hujan	Memberi notifikasi saat hujan terdeteksi
BME280	Suhu & Kelembapan	Naik/turun sesuai cuaca lingkungan
SW-420	Getaran	Responsif terhadap guncangan fisik
GP2Y1010AU0F	Partikel Debu	Terpengaruh oleh aktivitas lingkungan



GAMBAR 5
Tampilan Dashboard Skylink

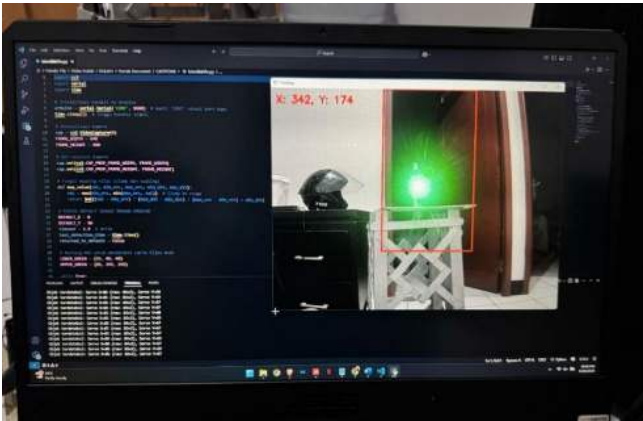


GAMBAR 6
Tampilan Dashboard Pengukuran Sensor Secara Keseluruhan

Dashboard Skylink secara real-time menampilkan data semua sensor, memungkinkan operator melakukan tindakan preventif jika terjadi anomali lingkungan yang dapat mengganggu sistem FSO.

D. Pengujian Sistem *Auto-Tracking*

Fitur *auto-tracking* diuji untuk memastikan stabilitas arah pancaran sinyal FSO saat terjadi pergeseran akibat getaran atau gangguan.



GAMBAR 7
Pengujian Sistem *Auto-Tracking*

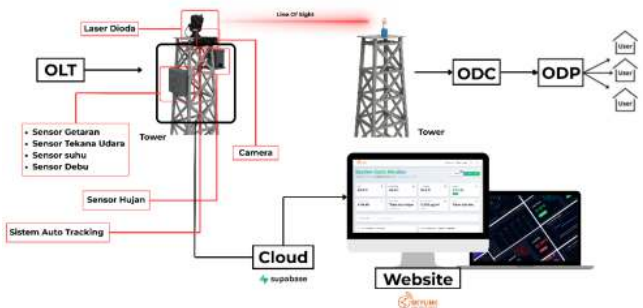
TABEL 4
HASIL PENGUJIAN *AUTO-TRACKING*

Komponen	Fungsi	Hasil Uji
Kamera	Deteksi target	Deteksi pusat objek berhasil
Servo MG90s	Koreksi arah pancaran laser	Bergerak otomatis menjaga line-of-sight

Sistem mampu mengarahkan ulang pancaran laser dalam rentang sudut 0°–180° secara akurat berdasarkan citra target yang terdeteksi kamera. Hal ini menjaga koneksi tetap stabil meskipun terjadi gangguan fisik pada posisi pemancar.

E. Blok Diagram Sistem

Untuk menjelaskan keseluruhan arsitektur sistem, ditampilkan blok diagram sistem utama yang menunjukkan integrasi antar komponen.



GAMBAR 8
Blok Diagram Sistem Keseluruhan

TABEL 5
SPESIFIKASI KESELURUHAN SISTEM

No	Nama Perangkat	Metode Pengujian	Data Pengujian	Status
1	Transmitter	Simulasi	2 dBm s.d 5 dBm	Daya Awal
2	Amplifier	Simulasi	Up to 43 dB	Penguatan Daya
3	FSO Channel	Simulasi	2.418 Km	Media Transmisi Jalur Feeder
4	Miniatur Tower	Pemodelan		Untuk Tx dan Rx FSO
5	Laser Dioda	Pemodelan	650 nm	Line of Sight (LoS)
6	Motor Servo	Pemodelan	Koordinat	X dan Y
7	Webcam	Pemodelan		Pemindai Rx FSO
8	Sensor Hujan	Pemodelan	50 mm/jam	Thujan Deras
9	Sensor Gecaran	Pemodelan		High/Low
10	Sensor Suhu & Kelembapan	Pemodelan	Suhu (°C) dan RH (%)	
11	Sensor Debu	Pemodelan	mg/m³ klasifikasi redaman	Fluktuatif dan Responsif
12	Supabase	Pemodelan	Datalse Keseluruhan Sensor	Integrasi ke Website
13	Website Skylink	Pemodelan	Visualisasi Perancangan	Menampilkan Grafik dan Angka
14	Splitter 1:8 (1)	Simulasi	Atenuasi 11 dB	Titik Awal Jalur Fiber
15	Splitter 1:8 (2)	Simulasi	Atenuasi 11 dB	Titik Akhir Jalur Distribusi
16	Drop Wire	Simulasi	200 meter	Kabel Untuk User
17	Receiver	Simulasi	Sensitivity > 28 dBm	Standar Rx > 26 dBm

Diagram memperlihatkan hubungan sistemik antara jaringan FSO, distribusi NG-PON, sensor pemantau IoT, dan unit pelacakan laser otomatis yang bekerja sinergis menjaga kinerja sistem secara keseluruhan.

V. KESIMPULAN

Sistem jaringan *hybrid* yang menggabungkan teknologi FSO dan NG-PON terbukti memberikan performa teknis andal, efisiensi biaya tinggi, dan fleksibilitas implementasi di wilayah dengan keterbatasan infrastruktur seperti Batununggal Bandung. Hasil simulasi mencatat *Link Power Budget* antara -25,196 dBm hingga -25,704 dBm, SNR mencapai 60 dB, *Q-Factor* dalam rentang 4,99–5,58, dan BER antara 10⁻⁹ hingga 10⁻⁷, seluruhnya berada dalam rentang aman. Dari sisi biaya, sistem *hybrid* menunjukkan penghematan sebesar 25% dibandingkan sistem G-PON dengan jangkauan pelanggan dua kali lebih besar. Sistem pemantauan berbasis IoT berhasil menampilkan data lingkungan secara real-time melalui dashboard Skylink, sementara fitur *auto-tracking* secara aktif menjaga arah pancaran sinyal dengan koreksi sudut hingga 180°. Dengan kombinasi kinerja teknis yang stabil, efisiensi biaya, dan keandalan pemantauan lingkungan, sistem ini layak diterapkan sebagai solusi jaringan akses modern yang efisien dan adaptif.

REFERENSI

[1] Republik Indonesia, “Peraturan Walikota (Perwali) Kota Bandung Nomor 589 Tahun 2013 tentang Penyelenggaraan Saluran *Fiber optic* Bersama Bawah Tanah,” pp. 1–9, 2013, Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/170687/perwali-kota-bandung-no-589-tahun-2013>

[2] F. E. A. El-Samie, S. E. El-Rabaie, M. I. Dessouky, and S. A. Alshebeili, “Advanced signal processing techniques for optical wireless communication systems,” Springer, 2013.

[3] D. Giusto, A. Iera, G. Morabito, and L. Atzori, “The Internet of Things: 20th Tyrrhenian Workshop on Digital Communications,” Springer, 2010.

- [4] R. Ramaswami, K. Sivarajan, and G. Sasaki, "Optical Networks: A Practical Perspective," 3rd ed., Morgan Kaufmann, 2009.
- [5] J. G. Proakis, "Digital Communications," 4th ed., McGraw-Hill, 2001.
- [6] G. P. Agrawal, "Fiber-Optic Communication Systems," 3rd ed., Wiley-Interscience, 2002.
- [7] A. K. Majumdar, "Free-Space Laser Communications: Principles and Advances," Springer, 2008.
- [8] G. Bradski and A. Kaehler, "Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library," O'Reilly Media, 2008.

