



Disertasi

**SINTESIS EKSPRESI WAJAH REALISTIK BERBASIS
FEATURE-POINT CLUSTER MENGGUNAKAN
*RADIAL BASIS FUNCTION***

SAMUEL GANDANG GUNANTO
07111160010007

DOSEN PEMBIMBING
Mochamad Hariadi, ST., MSc., PhD.
Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, ST., MT.

PROGRAM DOKTOR
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2018

LEMBAR PENGESAHAN

**SINTESIS EKSPRESI WAJAH REALISTIK BERBASIS *FEATURE-POINT*
CLUSTER MENGGUNAKAN *RADIAL BASIS FUNCTION***

Disertasi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Doktor
di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

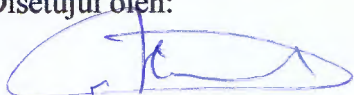
Oleh:

Samuel Gandang Gunanto (NRP: 07111160010007)

Tanggal Ujian: 14 Desember 2017

Periode Wisuda: Maret 2018

Disetujui oleh:



Mochamad Hariadi, S.T., M.Sc., Ph.D.
NIP. 19691209 199703 1 002

(Pembimbing I)

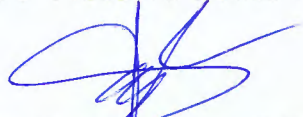


Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, S.T., M.T.
NIP. 19680601 199512 1 009

(Pembimbing II)

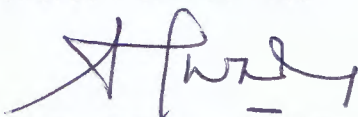
Prof. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng., Ph.D.
NIP. 19580916 198601 1 001

(Penguji I)



Dr. Surya Sumpeno, S.T., M.Sc.
NIP. 19690613 199702 1 003

(Penguji II)



Dr. Ir. Hilwadi Hindersah, M.Sc.
NIP. 19610705 198703 1 001

(Penguji III)



Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Ir. Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 19700212 199512 1 001

SINTESIS EKSPRESI WAJAH REALISTIK BERBASIS *FEATURE-POINT CLUSTER* MENGGUNAKAN *RADIAL BASIS FUNCTION*

Nama mahasiswa : Samuel Gandang Gunanto
NRP : 07111160010007
Pembimbing : Mochamad Hariadi, ST., M.Sc., Ph. D.
Ko-Pembimbing : Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, ST., MT.

ABSTRAK

Meningkatnya permintaan produk animasi oleh rumah produksi dan stasiun televisi menuntut adanya perubahan yang signifikan di dalam proses produksi animasi. Penelitian animasi ekspresi pada wajah khususnya mengenai proses *rigging* dan pemindahan ekspresi semakin banyak. Pendekatan tradisional animasi ekspresi wajah sangat tergantung pada animator dalam pembuatan gerakan kunci dan rangkaian gerakan ekspresi wajah. Hal ini menyebabkan produksi animasi wajah untuk satu wajah tidak dapat digunakan ulang secara langsung untuk wajah lainnya karena kekhususannya tersebut. Oleh karena itu proses otomatisasi pembentukan area pembobotan pada model wajah 3D dengan pendekatan cluster berikut proses duplikasi gerak yang adaptif terhadap bentuk wajah untuk mempersingkat proses produksi animasi sangat penting.

Prinsip animasi dipandang sebagai salah satu solusi dan panduan untuk pembuatan animasi gerak wajah yang ekspresif dan hidup. Sintesis ekspresi wajah realistik dapat dibuat dengan basis *feature-point cluster* menggunakan *radial basis function*. Otomatisasi pembentukan area gerak di wajah hasil proses *clustering* berdasarkan letak fitur titik dan proses *retargeting* menggunakan *radial basis function* untuk melakukan sintesis ekspresi wajah realistik merupakan kebaruan yang diangkat pada penelitian ini.

Berdasarkan semua tahapan eksperimentasi yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa sintesis ekspresi wajah realistik dengan basis *feature-point cluster* menggunakan *radial basis function* dapat diterapkan pada beragam model wajah 3D dan dapat secara adaptif peka terhadap bentuk wajah dari masing-masing model 3D yang memiliki jumlah fitur penanda yang sama. Hasil persepsi visual evaluasi penerapan sintesis ekspresi wajah realistik menunjukkan hasil ekspresi terkejut memiliki persentasi paling tinggi mudah dikenali, yaitu: 89,32%. Ekspresi senang: 84,63 %, ekspresi sedih: 77,32%, ekspresi marah: 76,64%, ekspresi jijik: 76,45%, serta ekspresi takut: 76,44%. Rerata persentase wajah mudah dikenali sebesar 80,13%.

Kata kunci : Sintesis ekspresi, pendekatan cluster, *radial basis function*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SYNTHESIS OF REALISTIC FACIAL EXPRESSION BASED ON FEATURE-POINT CLUSTER USING RADIAL BASIS FUNCTION

Name : Samuel Gandang Gunanto
NRP : 07111160010007
Supervisor : Mochamad Hariadi, ST., M.Sc., Ph. D.
Co-Supervisor : Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, ST., MT.

ABSTRACT

The increasing demand of animated movies by production houses and television stations needs a significant change in the animation production process. Computer facial animation research on the process of rigging and expression transfer is growing. The traditional approach of facial animation is highly dependent on the animator in making the key and the sequence of facial expression movements. This causes the production of facial animation for one face can not be reused directly for the other face because of its uniqueness. Therefore, the process of automating the formation of weighted areas on 3D face model with cluster approach and adaptive motion transfer process to face shape is very important to shorten the production process of animation.

The principle of animation is seen as one of the solutions and guidelines for the creation of animated facial expression expressively. The synthesis of realistic facial expression can be made on the basis of a feature-point cluster using a radial basis function. Automation process for formatting the motion area in the face by clustering process based on the location of the feature-point and retargeting process using radial basis function to perform synthesis of realistic facial expression is the novelty of this research.

Based on all experimentation stages, it can be concluded that the synthesis of realistic facial expression based on a feature-point cluster using radial basis function can be applied to various 3D face models and can be adaptively sensitive to the facial shape of each 3D model which has the same number of marker features. The results of visual perception evaluation from the synthesis of realistic facial expression show that surprise expression has the highest percentage and easily recognizable, 89,32%. Happy expression: 84,63%, sad expression: 77,32%, angry expression: 76,64%, disgust expression: 76,45%, and a fear expression: 76,44%. The average percentage of faces is easily recognizable at 80,13%.

Keywords: Expression Synthesis, cluster approach, radial basis function

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat dan rahmatNya yang berlimpah sehingga memungkinkan diri saya untuk menyelesaikan penelitian dan penulisan disertasi ini hingga selesai. Perjalanan panjang ini saya maknai dengan banyaknya rasa syukur atas bantuan, perhatian, bimbingan dan arahan yang saya dapatkan selama ini. Sekiranya ucapan ini saya pribadi haturkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus, Bunda Maria dan para kudus yang selalu memberikan restu, harapan dan kedamaian hati ini,
2. Papi dan mami, Yuventius Basuki Sujarwo dan Elisabet Nanik Wardhani yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan jasmani dan rohani,
3. Istriku tercinta, Luisa Diana Handoyo, beserta keempat anakku yang selalu menceriakan hidupku dan tak henti-hentinya mendukungku: Anastasia Saraswati Widiningtyas, Klara Putri Arumningtyas, Maria Caroline Ayuningtyas, dan Laurensia Kirana Adiningtyas.
4. Bapak Mochamad Hariadi, ST., M.Sc., Ph. D. selaku promotor dan Bapak Dr. Eko Mulyanto Yuniarno, ST., MT. selaku co-Promotor, atas bimbingan dan arahnya selama studi dan penelitian,
5. Bapak Prof. Ir. Mauridhi Hery Purnomo, M.Eng., Ph.D., Bapak Dr. Surya Sumpeno, S.T., M.Sc., dan Bapak Dr. Ir. Hilwadi Hindersah, M.Sc., selaku penguji yang selalu memberikan arahan dan tuntunan demi pengembangan diri dan kualitas penelitian,
6. Kepada seluruh jajaran pimpinan Program Doktor Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan segenap karyawan yang telah dengan baik melayani saya selama menjadi mahasiswa,
7. Kepada seluruh jajaran pimpinan Institut Seni Indonesia Yogyakarta, Fakultas Seni Media Rekam, dan Program Studi Animasi atas ijin yang

diberikan untuk studi lanjut dan dukungan sarana dan prasarana selama studi dan penelitian,

8. Rekan-rekan peneliti di lab Visikom Teknik Elektro ITS dan lab komputer Program Studi Animasi, atas bantuan dan dukungannya selama studi dan pelaksanaan penelitian bersama,
9. Seluruh kolega di Program Studi Animasi, Fakultas Seni Media Rekam, ISI Yogyakarta serta seluruh teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu

Penulis secara pribadi mohon maaf jika masih ada kekurangan yang dijumpai, semoga naskah disertasi ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan mampu menjadi acuan bagi pembaca dalam mengembangkan riset di bidang animasi.

Hormat saya,

Samuel Gandang Gunanto

DAFTAR ISI

ABSTRAK	v
ABSTRACT	vii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xxi
DAFTAR SIMBOL	xxiii
DAFTAR ISTILAH	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	7
1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian	8
1.4 Penelitian Sebelumnya	8
1.5 Kontribusi dan Orisinalitas Penelitian	14
1.6 Sistematika Penelitian	14
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	17
2.1 Animasi Ekspresi Wajah 3 Dimensi Berbasis Komputer	17
2.2 Animasi Wajah Berdasarkan Data <i>Motion Capture</i>	19
2.3 Titik Fitur Wajah Berdasarkan Standar MPEG-4	20
2.4 Penulangan Gerak Wajah	22
2.5 Transformasi <i>Radial Basis Function</i>	24
2.6 Pemrosesan Emosi Ekspresif dengan Prinsip <i>Exaggeration</i>	25
2.7 Deformasi <i>Mesh</i> dengan Teknik <i>Skinning</i>	27
2.7.1 Perubahan Bentuk 2D dan 3D (<i>Morphing</i>)	27
2.7.2 Deformasi Bentuk Bebas.....	28
2.7.3 Otot Semu <i>Spline</i>	29
2.8 Pemrosesan Interpolasi Bentuk <i>Blendshape</i>	31
2.9 Pendekatan Khusus Permodelan Wajah 3D.....	33
2.10 Pemindahan Animasi Wajah.....	35

2.11 Pembangkitan Gerak Wajah	37
BAB 3 <i>FEATURE POINT CLUSTER</i>	39
3.1 <i>Feature-point</i>	39
3.2 Perhitungan Jarak Antar Dua Titik	40
3.3 <i>Cluster</i> dan <i>Clustering</i>	43
3.4 <i>K-means Clustering</i>	43
3.5 <i>Feature-points clustering</i>	47
3.6 Otomatisasi Segmentasi Area Gerak pada Model Wajah 3D Meng- gunakan <i>Feature-points clustering</i>	49
3.7 Eksperimentasi <i>Feature-points Clustering</i> pada Model 3D Wajah Ma- nusia	52
BAB 4 <i>RETARGETING</i> PADA ANIMASI WAJAH VIRTUAL 3D BERBASIS DATA <i>MARKER</i> MENGGUNAKAN <i>RADIAL BASIS FUNCTION</i>	83
4.1 Pendahuluan	83
4.2 Tahapan Eksperimentasi	85
4.3 Ekstraksi dan Registrasi <i>Feature-point</i>	87
4.4 Pelatihan dan Analisa.....	91
4.5 Pengujian dan Validasi.....	95
4.5.1 Ekspresi Sedih.....	95
4.5.2 Ekspresi Senang.....	97
4.5.3 Ekspresi Marah.....	98
4.5.4 Ekspresi Jijik.....	100
4.5.5 Ekspresi Takut.....	101
4.5.6 Ekspresi Terkejut.....	102
4.6 Kesimpulan Proses Retargeting.....	104
4.7 Eksperimentasi Deformasi Linier Pada Model Wajah Virtual 3D Untuk Sintesis Ekspresi Wajah Realistik Berbasis <i>Feature-point Cluster</i> Menggunakan <i>Radial Basis Function</i>	104
4.8 Evaluasi Hasil Sintesis Ekspresi Wajah ke Karakter 3D	107
4.9 Pembahasan Hasil Sintesis dan Kuisisioner.....	109

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....	111
5.1 Kesimpulan.....	111
5.2 Saran.....	112
DAFTAR PUSTAKA.....	113
LAMPIRAN.....	119
BIODATA PENULIS.....	131

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Letak titik <i>rigging</i> di mulut untuk penganimasian percakapan atau ekspresi yang berkaitan dengan mulut (Orvalho, Zacur, & Susin, 2008)	2
Gambar 1.2	Salah satu contoh aplikasi pemindahan ekspresi wajah menggunakan teknik <i>motion capture</i> , wajah manusia yang ditempel <i>marker</i> (kiri) dan model wajah virtual 3D sebagai tujuan transfer pergerakan(kanan) (Curio, et al., 2006)	4
Gambar 1.3	Implementasi <i>action unit</i> FACS mulut terbuka lebar yang bersumber dari tangkapan kamera stereo(kiri), pembangunan model berdasarkan informasi kedalaman(tengah) dan model acuan <i>action unit</i> sebagai <i>blendshape</i> (Weise, Bouaziz, Li, & Pauly, 2011)	6
Gambar 1.4	Skema kontribusi penelitian dan kebaruan terhadap penelitian sebelumnya	13
Gambar 2.1	Penjejukan seketika dijalankan tanpa penanda di wajah menggunakan sistem penjejukan <i>eyematic</i> , Inc. (Essa, Basu, Darrell, & Pentland, 1996)	19
Gambar 2.2	Pengambilan data <i>motion capture</i> (kiri) dan implementasinya di model wajah 3D(kanan) (Curio, et al., 2006)	20
Gambar 2.3	Bagian titik fitur wajah standar di MPEG-4.....	23
Gambar 2.4	<i>Facial rigging</i> (tengah) dari model 3D(kiri) yang ditentukan area terpengaruh-geraknya di area hidung secara manual(kanan) (Parke & Waters, 2008)	23
Gambar 2.5	Alur <i>retargeting</i> berbasis RBF (Dutrevé, Meyer, & Bouakaz, 2008)	25
Gambar 2.6	Cara kerja <i>Free Form Deformation</i> (FFD). (Sederberg & Parry, 1996)	28
Gambar 2.7	Interpolasi linier dilakukan pada <i>blend shapes</i> . Kiri: pose netral, kanan: pose dengan bentuk mulut “A”, dan tengah: hasil interpolasinya. (Lewis, Cordner, & Fong, 2000)	32
Gambar 3.1	Korelasi <i>feature-point</i> ke-14 dengan titik <i>marker</i> pada wajah di posisi ke-14.	40
Gambar 3.2	Perbedaan cara perhitungan jarak antara <i>euclidean distance</i> $d_{p,q}$ dengan <i>manhattan distance</i> $dI_{p,q}$ untuk dua buah titik p dan q	41
Gambar 3.3	Koordinat bola (ρ, θ, ϕ)	42
Gambar 3.4	Sekelompok data tersebar x dalam bidang kartesian xy .	45
Gambar 3.5	Hasil pengelompokan data dengan 2 buah <i>centroid</i> awal, yaitu c_1 dan c_2 yang dipilih secara acak	45

Gambar 3.6	Hasil pengelompokan data terbaru dengan 2 buah <i>centroid</i> c_1 dan c_2 yang merupakan hasil rata-rata dari <i>cluster</i> S_1 dan S_2	46
Gambar 3.7	Hasil akhir pengelompokan data dan terbentuklah <i>cluster</i> S_1 dan S_2	46
Gambar 3.8	Sebuah titik xs_{12} yang akan ditentukan keanggotaannya terhadap tiga buah <i>cluster</i> yang memiliki titik pusat berupa <i>feature-point</i> f_1, f_2 , dan f_3	48
Gambar 3.9	Nilai jarak titik xs_{12} terhadap ketiga buah pusat <i>cluster</i> f_1, f_2 , dan f_3 sebagai nilai $d_{12,1}, d_{12,2}$, dan $d_{12,3}$	48
Gambar 3.10	Keanggotaan titik xs_{12} pada <i>cluster</i> P_1 yang berpusat pada f_1 dikarenakan nilai jarak terdekatnya yaitu $\min(D_{12}) = d_{12,1}$	49
Gambar 3.11	Alur pembentukan <i>feature-points cluster</i> pada model wajah 3D	51
Gambar 3.12	Proses penentuan anggota <i>cluster</i> untuk <i>vertex</i> vs_1	52
Gambar 3.13	a) <i>vertex</i> wajah 3D; b) garis poligonal 3D membentuk wajah; c) model wajah 3D <i>low-poly</i> ; d) wajah 3D poligonal	52
Gambar 3.14	Variasi sintesis lokasi <i>feature-points</i> pada model 3D wajah manusia dengan a) 7 <i>feature-points</i> ; B) 23 <i>feature-points</i> ; C) 33 <i>feature-points</i>	53
Gambar 3.15	Registrasi dan ekstraksi <i>vertex</i> yang akan diproses <i>feature-points clustering</i> (kiri) dengan jumlah dan posisi <i>feature-points</i> sebanyak 23 titik(kanan)	53
Gambar 3.16	Area <i>cluster</i> ke-1 di kening kanan	54
Gambar 3.17	Area <i>cluster</i> ke-2 di kening kiri	54
Gambar 3.18	Area <i>cluster</i> ke-3 di pelipis kanan	55
Gambar 3.19	Area <i>cluster</i> ke-4 di pelipis kiri	55
Gambar 3.20	Area <i>cluster</i> ke-5 di kelopak mata kanan	56
Gambar 3.21	Area <i>cluster</i> ke-6 di kelopak mata kiri	56
Gambar 3.22	Area <i>cluster</i> ke-7 di bawah mata kanan	57
Gambar 3.23	Area <i>cluster</i> ke-8 di bawah mata kiri	57
Gambar 3.24	Area <i>cluster</i> ke-9 di sisi hidung sebelah kiri	58
Gambar 3.25	Area <i>cluster</i> ke-10 di sisi hidung sebelah kanan	58
Gambar 3.26	Area <i>cluster</i> ke-11 di sisi pipi sebelah kiri	59
Gambar 3.27	Area <i>cluster</i> ke-12 di sisi pipi sebelah kanan	59
Gambar 3.28	Area <i>cluster</i> ke-13 di sisi kiri rahang bawah	60
Gambar 3.29	Area <i>cluster</i> ke-14 di sisi kanan rahang bawah	60

Gambar 3.30	Area <i>cluster</i> ke-15 di ujung bibir kiri	61
Gambar 3.31	Area <i>cluster</i> ke-16 di ujung bibir kanan.....	61
Gambar 3.32	Area <i>cluster</i> ke-17 di bibir atas bagian kiri	62
Gambar 3.33	Area <i>cluster</i> ke-18 di bibir atas bagian tengah	62
Gambar 3.34	Area <i>cluster</i> ke-19 di bibir atas bagian kanan	63
Gambar 3.35	Area <i>cluster</i> ke-20 di bibir bawah bagian kiri	63
Gambar 3.36	Area <i>cluster</i> ke-21 di bibir bawah bagian tengah	64
Gambar 3.37	Area <i>cluster</i> ke-22 di bibir bawah bagian kanan	64
Gambar 3.38	Area <i>cluster</i> ke-23 di bagian tengah dagu	65
Gambar 3.39	Hasil <i>feature-points clustering</i> untuk model wajah manusia 3D dengan 3324 vertek (model <i>low-poly</i>).....	65
Gambar 3.40	Hasil pembentukan <i>cluster</i> sebagai area bobot untuk model wajah kartun 3D dengan 1260 <i>vertex</i> (model <i>low poly</i>)	66
Gambar 3.41	Hasil segmentasi dengan 33 titik <i>feature-points</i> dan pendekatan perhitungan jarak <i>haversine</i> pada model 3D wajah manusia	67
Gambar 3.42	Kesalahan pembentukan <i>cluster</i> di area mulut terdeformasi dikarenakan anggota <i>cluster</i> yang tersebar lintas area <i>cluster</i> lainnya	68
Gambar 3.43	Perbandingan hasil <i>clustering</i> : a)sebelum dilakukannya perbaikan area <i>cluster</i> dan b) kondisi setelah dilakukannya perbaikan menggunakan pendekatan proyeksi peta ortogonal pada model 3D wajah karakter kartun yang memiliki ciri mulut terdeformasi, karakter angsa	69
Gambar 3.44	Hasil sintesis ekspresi senang berbasis <i>feature-point cluster</i> di karakter wajah manusia pada frame ke-1, 13 dan 23.....	70
Gambar 3.45	Visualisasi sintesis ekspresi senang dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%	71
Gambar 3.46	Hasil sintesis ekspresi marah berbasis <i>feature-point cluster</i> di karakter wajah manusia pada frame ke-1, 12 dan 23.....	72
Gambar 3.47	Visualisasi sintesis ekspresi marah dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%	73
Gambar 3.48	Hasil sintesis ekspresi takut berbasis <i>feature-point cluster</i> di karakter wajah manusia pada frame ke-1, 5 dan 9.....	74
Gambar 3.49	Visualisasi sintesis ekspresi takut dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%	75
Gambar 3.50	Hasil sintesis ekspresi terkejut berbasis <i>feature-point cluster</i> di karakter wajah manusia pada frame ke-1, 8 dan 11	76

Gambar 3.51	Visualisasi sintesis ekspresi terkejut dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%	77
Gambar 3.52	Hasil sintesis ekspresi sedih berbasis <i>feature-point cluster</i> di karakter wajah manusia pada frame ke-6, 12 dan 17.....	78
Gambar 3.53	Visualisasi sintesis ekspresi sedih dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%	79
Gambar 3.54	Hasil sintesis ekspresi jijik berbasis <i>feature-point cluster</i> di karakter wajah manusia pada frame ke-1, 8 dan 16.....	80
Gambar 3.55	Visualisasi sintesis ekspresi jijik dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%	81
Gambar 4.1	Alur transformasi ruang RBF	84
Gambar 4.2	Posisi peletakan 33 <i>marker</i> berdasarkan standar <i>OptiTrack</i> .(sumber: https://www.optitrack.com/products/expression/)	85
Gambar 4.3	Alur penelitian untuk menghasilkan sintesis ekspresi wajah realistik dengan salah satu tahapannya berupa <i>retargeting</i> menggunakan <i>radial basis function</i>	86
Gambar 4.4	Label penomoran <i>marker</i> untuk fitur titik hasil ekstraksi..	87
Gambar 4.5	Pemilihan nomor parameter untuk <i>feature-point</i> nomor 1 pada <i>frame</i> ke- <i>t</i>	89
Gambar 4.6	Citra wajah manusia berekspresi netral dengan titik <i>marker</i>	91
Gambar 4.7	Titik <i>marker</i> dari citra wajah 2D pada ekspresi netral.....	92
Gambar 4.8	Titik fitur dari wajah model 3D pada ekspresi netral.....	93
Gambar 4.9	Citra wajah manusia berekspresi sedih dengan titik <i>marker</i>	93
Gambar 4.10	Citra wajah manusia berekspresi senang dengan titik <i>marker</i>	94
Gambar 4.11	Citra wajah manusia berekspresi marah dengan titik <i>marker</i>	94
Gambar 4.12	Citra wajah manusia berekspresi jijik dengan titik <i>marker</i>	94
Gambar 4.13	Citra wajah manusia berekspresi takut dengan titik <i>marker</i>	95
Gambar 4.14	Citra wajah manusia berekspresi terkejut dengan titik <i>marker</i>	95
Gambar 4.15	Posisi titik <i>marker</i> yang bergeser pada ekspresi sedih.....	96
Gambar 4.16	Pergeseran titik <i>marker</i> pada ekspresi wajah manusia sedih.....	96
Gambar 4.17	Pergeseran titik <i>marker</i> pada ekspresi wajah model sedih.....	97
Gambar 4.18	Posisi titik <i>marker</i> yang bergeser pada ekspresi senang...	97
Gambar 4.19	Pergeseran titik <i>marker</i> pada ekspresi wajah manusia senang.....	98

Gambar 4.20	Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model senang.	98
Gambar 4.21	Posisi titik <i>marker</i> yang bergeser pada ekspresi marah...	99
Gambar 4.22	Pergeseran titik <i>marker</i> pada ekspresi wajah manusia marah.....	99
Gambar 4.23	Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model marah..	99
Gambar 4.24	Posisi titik <i>marker</i> yang bergeser pada ekspresi jijik.....	100
Gambar 4.25	Pergeseran titik <i>marker</i> pada ekspresi wajah manusia jijik	100
Gambar 4.26	Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model jijik.....	101
Gambar 4.27	Posisi titik marker yang bergeser pada ekspresi takut.....	101
Gambar 4.28	Pergeseran titik marker pada ekspresi wajah manusia takut.....	102
Gambar 4.29	Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model takut....	102
Gambar 4.30	Posisi titik marker yang bergeser pada ekspresi terkejut..	103
Gambar 4.31	Pergeseran titik marker pada ekspresi wajah manusia terkejut.....	103
Gambar 4.32	Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model terkejut	103
Gambar 4.33	Hasil visualisasi ekspresi senang.....	106
Gambar 4.34	Hasil visualisasi ekspresi sedih.....	106
Gambar 4.35	Contoh penerapan perubahan titik fitur penanda akibat pergerakan pada model 3D selain manusia.....	107
Gambar 4.36	Visualisasi hasil transfer ekspresi ke model wajah 3D: a) Jijik; b) Marah; c) Takut; d) Senang; e) Terkejut; f) Sedih.....	108

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Matrik penelitian sebelumnya.....	11
Tabel 2.1	Grup FAP di MPEG-4.....	21
Tabel 2.2	Contoh <i>action units</i> wajah tunggal.....	26
Tabel 2.3	Contoh himpunan <i>action units</i> untuk ekspresi dasar.....	26
Tabel 4.1	Tabulasi Jawaban Kuisisioner Persepsi Visual Terhadap Hasil Sintesis Ekspresi	102

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR SIMBOL

α	: Nilai bobot untuk setiap koordinat dari wajah model 3D
Φ	: Simbol fungsi radial
C	: Matrik himpunan <i>centroid</i>
c	: Matrik elemen <i>centroid</i>
D	: Himpunan jarak
d	: Elemen himpunan jarak
d_i	: Nilai jarak titik i
$d_{maksimum}$: Nilai jarak maksimum dari semua <i>vertex</i> anggota ke pusat <i>cluster</i>
E_{happy}	: Ekspresi senang
$E_{sadness}$: Ekspresi sedih
E_{anger}	: Ekspresi marah
$E_{surprise}$: Ekspresi terkejut
$E_{disgust}$: Ekspresi jijik
F	: Himpunan <i>feature-point</i>
f	: Elemen matrik <i>feature-point</i>
FM	: Himpunan <i>frame</i>
fm	: Elemen matrik <i>frame</i>
H	: Matrik gabungan hasil dari fungsi radial
I	: Matrik intensitas keabu-abuan
m	: Banyaknya elemen <i>feature-point</i>
n	: Banyaknya data titik
P	: Matrik <i>feature-point cluster</i>
r	: Jarak terpendek dari semua titik <i>marker</i> pada wajah sumber
S	: Sumber sintesis ekspresi wajah
S_i	: Matrik sumber selain <i>frame</i> ke-1
S_o	: Matrik sumber <i>frame</i> ke-1
T	: Target sintesis ekspresi wajah
T_{angsa}	: Target sintesis ekspresi model wajah 3D karakter angsa

T_{anoman}	: Target sintesis ekspresi model wajah 3D karakter anoman
T_{human}	: Target sintesis ekspresi model wajah 3D manusia
T_i	: Matrik hasil <i>retargeting</i>
T_o	: Matrik target pada posisi netral
t	: Waktu
tr	: Elemen matrik target T_o
V	: Matrik <i>vertex</i> model wajah 3D
V_i	: Nilai <i>vertex</i> baru
V_o	: Nilai <i>vertex</i> awal
V_s	: Matrik <i>vertex</i> model wajah 3D selain <i>centroid</i> sebagai matrik potensial anggota <i>cluster</i>
vs	: Elemen matrik potensial anggota <i>cluster</i>
w	: Nilai bobot perubahan
w_i	: Nilai bobot titik i
X	: Himpunan titik x
X_s	: Himpunan titik x terpilih yang bukan merupakan <i>feature-Point</i>
xy	: Nilai posisi <i>marker</i> pada citra 2D

DAFTAR ISTILAH

<i>Feature-point</i>	: titik fitur yang menjadi acuan gerak
<i>Centroid</i>	: pusat <i>cluster</i>
<i>Cluster</i>	: kelompok data <i>vertex</i> yang memiliki pusat
<i>Euclidean</i>	: formula jarak dengan asumsi jarak berupa garis lurus dan dihitung menggunakan teorema pythagoras
<i>Retargeting</i>	: transformasi pemetaan ulang target berdasarkan perubahan pada data sumber
<i>Mesh deformation</i>	: perubahan bentuk <i>mesh</i>
<i>Radial basis function</i>	: metode transformasi ruang

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Produksi film animasi 3D yang berbantuan teknologi komputer semakin berkembang pesat. Industri hiburan telah memainkan peran penting yang mendorong terjadinya perkembangan teknologi komputer grafis. Saat ini setidaknya satu buah film animasi dapat diproduksi dalam waktu satu tahun oleh sebuah studio besar. Bahkan penggunaan karakter digital dalam sebuah produksi film animasi sudah menjadi hal yang umum dijumpai, baik yang berwujud menyerupai aktor manusia maupun aktor kartun.

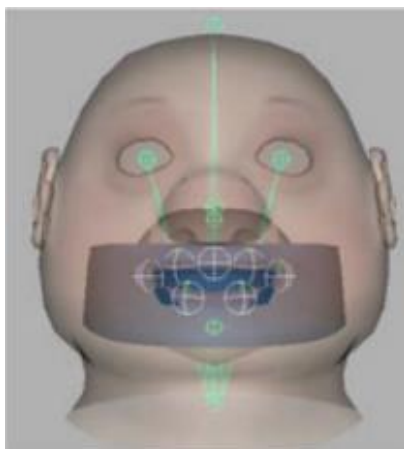
Permintaan produktivitas animasi yang tinggi dan cepat oleh rumah produksi dan stasiun-stasiun televisi menuntut terjadinya perubahan yang signifikan di dalam proses produksi animasi. Hal ini merupakan permasalahan utama yang dihadapi oleh para studio animasi Indonesia. Kecepatan produksi animasi berbanding lurus dengan biaya produksi yang tinggi, sehingga hanya sedikit produk animasi yang bisa dihasilkan.

Kelangkaan sumber daya animasi yang ada sekarang menjadi kendala utama jika dikehendaki percepatan dalam proses produksi animasi, khususnya dikarenakan proses pembuatan gerakan pada animasi saat ini masih banyak menggunakan teknik manual dengan mengandalkan pengubahan *frame-by-frame*. Hal ini akan banyak menyita waktu dan membutuhkan sumber daya manusia yang besar.

Pendekatan tradisional untuk menganimasikan ekspresi model wajah bergantung pada seorang seniman untuk menciptakan gerakan kunci dan kemudian menggabungkannya menjadi serangkaian gerakan ekspresi wajah. Game dengan aturan permainan yang interaktif membutuhkan adanya animasi wajah dalam melakukan komunikasi atau interaksi dengan area permainannya. Karena sumber daya yang terbatas, animasi wajah dalam game sering ditiadakan. Namun akhir-akhir ini dengan munculnya sistem permainan game yang diselingi film animasi didalamnya menuntut keberadaan animasi ekspresi wajah yang mutlak ada untuk

memberikan aspek hiburan dan cerita bagi si pemain. Problematika yang dijumpai bagi produsen adalah penggunaan kerangka dan gerakan wajah yang sama dalam model yang berbeda adalah tugas yang sangat menghabiskan waktu bagi para animator (Orvalho, Zacur, & Susin, 2006). Problematika ini juga terjadi pada pembuatan gerakan animasi wajah dikarenakan penyesuaian gerakan yang alami dan detail diperlukan untuk membuat ekspresi wajah menjadi menarik dan membuat karakter menjadi lebih realistik. Oleh karena itu pencarian sebuah solusi yang mampu menangani permasalahan itu menjadi prioritas utama untuk dikerjakan, terlebih yang mampu memunculkan sebuah desain teknologi tepat guna di sektor industri animasi.

Animasi wajah realistik merupakan aspek penting di lingkungan virtual 3D yang menghadirkan keberadaan karakter, baik manusia maupun yang menyerupainya. Pemanfaatannya meliputi industri game 3D, perangkat lunak interaktif, dan film animasi 3D. Bagaimanapun juga untuk menghasilkan animasi wajah yang baik diperlukan waktu yang lama bagi seorang animator ahli dikarenakan kompleksitas ekspresi wajah manusia yang merupakan bagian penting dalam pergerakan secara alamiah (Parke, 1972). Bahkan sampai saat ini perkembangan penelitian animasi wajah masih banyak dihasilkan, terutama untuk dua aspek penting: proses *rigging* wajah dan pemindahan ekspresi antar dua buah karakter virtual 3D atau antar manusia ke karakter 3D. Gambar 1.1 menunjukkan posisi titik *rigging* yang terletak di mulut dengan fungsi pergerakan artikulasi mulut saat karakter tersebut berbicara atau berekspresi.



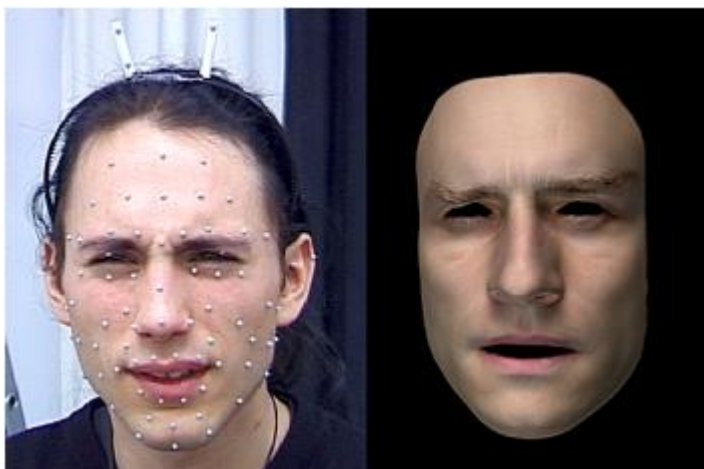
Gambar 1.1 Letak titik *rigging* di mulut untuk penganimasian percakapan atau ekspresi yang berkaitan dengan dengan mulut (Orvalho, Zacur, & Susin, 2008).

Proses *rigging* membutuhkan waktu pengerjaan manual yang lama bagi seniman. Bahkan bagi metode sederhana seperti *shape-blending*, seorang seniman perlu membuat sebuah bentuk acuannya. Pendekatan teknik *skinning* secara umum memerlukan pendefinisian manual tentang persendian yang mempengaruhi pergerakan pada wajah, seperti pada alis, dahi, pipi/rahang, dan mulut. Jika animasi wajah menggunakan pendekatan simulasi kulit wajah dan otot, intervensi seniman selaku animator terdapat pada pengaturan kulit wajah terhadap tulang/tengkorak kepala dan konfigurasi sambungan-sambungan otot gerak di wajah. Sehingga hal inilah yang menyebabkan produksi animasi wajah untuk satu wajah tidak dapat digunakan ulang secara langsung untuk wajah lainnya karena kompleksitas dan kekhususannya tersebut.

Aspek penelitian yang kedua di bidang animasi wajah adalah mengenai ide produksi animasi wajah yang alamiah dengan melakukan pemindahan gerak dari satu wajah ke wajah karakter yang baru. Hal ini dapat dilakukan dengan cara panduan gerak tangkapan kamera video 2D dari aktor manusia secara langsung ataupun dengan pemindahan gerak dari karakter virtual yang telah ada. Cara kedua ini memiliki manajemen memori yang baik sehingga sering digunakan untuk produksi animasi di industri game. Proses penyimpanan gerak dilakukan dengan menyimpan satu buah informasi gerak untuk gerakan yang sama. Namun selain keuntungan teknik ini, kesulitan yang dijumpai juga cukup besar, yaitu proses pembuatan model target animasi yang diupayakan menyerupai aktor aslinya supaya dapat optimal menangkap detail ekspresi wajah sang aktor, khususnya titik-titik wajah yang mempengaruhi ekspresi. Hal tersebut menyebabkan diperlukannya sebuah teknik pemindahan ekspresi yang mampu mengadaptasi perubahan sumber/aktor dan perubahan bentuk morfologi model targetnya. Salah satu contoh aplikasi pemindahan ekspresi adalah dengan teknik *motion capture* pada wajah manusia dan digunakan ulang di wajah model 3D secara virtual pada Gambar 1.2.

Pemanfaatan teknologi visi komputer sudah ada di berbagai bidang ilmu, salah satunya yang sedang berkembang saat ini adalah pengembangan di ranah ilmu seni kreatif digital, seperti animasi dan game. Di bidang ini, teknologi visi komputer

berperan di area produksi (Perales, 2002). Waktu produksi yang pada umumnya memakan waktu lama dapat dipersingkat secara signifikan.



Gambar 1.2 Salah satu contoh aplikasi pemindahan ekspresi wajah menggunakan teknik *motion capture*, wajah manusia yang ditempel *marker*(kiri) dan model wajah virtual 3D sebagai tujuan transfer pergerakan(kanan) (Curio, et al., 2006)

Teknologi visi komputer yang berperan penting di bidang animasi dan game sebagai pengatur gerak model virtual adalah penangkapan gerak manusia atau *human motion capture*. Teknologi ini mengadopsi indera mata manusia untuk mengenali fenomena tangkapan kamera. Gerakan manusia yang ditangkap dapat dipetakan ke dalam sebuah model figur kerangka gerak. Hal ini juga berlaku bagi gerakan pada wajah dengan mengandalkan fitur penanda. Letak fitur penanda ditempatkan pada sendi gerak wajah dan otot yang memiliki pergerakan signifikan dalam perubahan ekspresi. Hal ini digunakan supaya penangkapan gerak pada wajah dapat optimal, sehingga pemetaannya nanti pada model virtual dapat menyerupai aslinya. Prinsip utama dari penangkapan gerak manusia adalah pembangkitan animasi gerak model 3D oleh model manusia sesungguhnya melalui penangkapan kamera (Aggarwal & Cai, 1999). Keandalan sistem ini ditentukan oleh ketepatan estimasi dari pose model, sehingga penentuan tiap segmen tubuh manusia di tahapan awal merupakan kunci keberhasilannya. Semakin akurat proses deteksi obyeknya, makin handal sistem yang dibangun (Perales, 2002) (Moeslund, 1999).

Pemanfaatan teknologi ini sudah digunakan secara industri di bidang animasi dan game. Keterlibatannya berperan dalam sektor produksi dan bahkan

juga dimanfaatkan sebagai antarmuka dengan pengguna atau pemain. Namun karena mahalnya implementasi dan operasional dalam sektor produksi (Shipley & Brumberg, 2005) (Perales, 2002), teknologi ini menjadi jarang digunakan dan tidak dipunyai oleh studio-studio animasi di Indonesia yang tergolong masih dalam kriteria studio kecil.

Metode pembuatan ekspresi wajah 3D secara prinsip ada 2 buah, yaitu: dengan penggunaan data hasil pemindai 3D atau hasil dari pahatan seniman. (Faigin, 2008) (Joshi, Tien, Desbrun, & Pighin, 2003) Pada pembuatan animasi menggunakan *blend-shapes*, setiap bentuk ekspresi wajah membutuhkan kesamaan geometri model wajah pada posisi netral. Hal ini membutuhkan waktu 2-3 minggu dan lebih dari 100 *shapes* dibuat untuk mewujudkan ekspresi wajah dan fonem dari sebuah karakter yang kompleks. Hal ini dapat diatasi dengan melakukan transfer otomatis bentuk dari model sumber ke model target yang dikehendaki (Orvalho, Zacur, & Susin, 2008).

Ekspresi wajah manusia terbentuk dari adanya kontraksi otot wajah. Kulit berubah bentuknya dari kondisi awal dikarenakan adanya perubahan bentuk otot dan pergerakan tulang. Untuk menghidupkan ekspresi karakter virtual merupakan tantangan yang besar karena wajah mampu menghasilkan sekitar 5000 ekspresi. Karakter seperti Shrek, film animasi tahun 2001, memiliki lebih dari 500 perintah yang diatur oleh fitur wajah. Dick Walsh menjelaskan bahwa untuk alis kanan ada kondisi dinaikkan, marah, sedih dengan setidaknya 15 kemungkinan perintah untuk mengaktifkan alis dan bagian lain dari wajah yang harus bergerak untuk menghasilkan ekspresi yang meyakinkan (Orvalho, Zacur, & Susin, 2008).

Jika dibandingkan dengan perkembangan animasi gerak tubuh yang telah lebih dahulu berkembang, penelitian di bidang animasi gerak wajah masih memerlukan banyak penyempurnaan. Saat ini pengendalian animasi gerak wajah masih tergantung pada keahlian pengolahan manual animator atau hasil peniruan aksi aktor yang sesungguhnya. *Facial Action Coding System* atau FACS (Ekman & Friesen, 1978) merupakan sistem yang berguna untuk membantu melakukan analisis dan simulasi ekspresi gerak wajah serealistik mungkin, namun hal ini masih kurang dalam menggambarkan ekspresi wajah karakter animasi yang seharusnya seperti layaknya karakter kartun. Pada Gambar 1.3 merupakan salah satu contoh

penerapan FACS pada produksi animasi ekspresi wajah dengan terlebih dahulu menangkap informasi wajah sumber(kiri) menggunakan kamera stereo dan membangun modelnya berdasarkan informasi kedalaman(tengah) untuk disamakan dengan acuan model *action unit* mulut terbuka lebar dalam bentuk *blendshape*.

Prinsip animasi dipandang sebagai salah satu solusi dan panduan untuk pembuatan animasi gerak wajah yang ekspresif dan realistis. Tanpa penerapan prinsip tersebut, makna gerak karakter secara keseluruhan akan terasa hilang (Chung, 2010). Sehingga dengan melakukan pengembangan sistem animasi gerak wajah yang mampu mengadaptasi prinsip animasi akan meningkatkan aspek kualitas visual animasi.



Gambar 1.3 Implementasi *action unit* FACS mulut terbuka lebar yang bersumber dari tangkapan kamera stereo(kiri), pembangunan model berdasarkan informasi kedalaman(tengah) dan model acuan *action unit* sebagai *blendshape* (Weise, Bouaziz, Li, & Pauly, 2011)

Aspek keunikan bentuk wajah juga menjadi tantangan tersendiri bagi animator dalam membentuk ekspresi wajah. Area terdampak gerak pada wajah setiap model sangat beragam, hal ini juga yang menjadi permasalahan bagi animator untuk proses otomatisasi transfer ekspresi antar model wajah. Otomatisasi dalam menentukan area gerak harus bisa meminimalkan campur tangan manusia dalam prosesnya. Aspek adaptif dinilai dengan kemampuan algoritma untuk menghasilkan area gerak berdasarkan bentuk model wajah 3D, wajah manusia atau wajah karakter kartun. Pada penelitian ini pendekatan cluster dipilih karena mampu mengklasifikasi anggota secara otomatis dan peka terhadap posisi vertek, sehingga dapat memastikan setiap vertek memiliki pusat gerak yang akan dijadikan acuan

deformasi. Hal itu dianggap penting karena tahapan ini di industri masih dilakukan secara manual. Proses ini sangat memakan waktu dan menghabiskan terlalu banyak sumber daya manusia karena setiap karakter pergerakannya didasarkan pada ekspresi dan keunikannya masing-masing.

Pergerakan yang ditangkap melalui kamera dengan menggunakan prinsip *motion capture* berbasis penanda memerlukan proses penjejakan dan pemetaan gerak yang akurat supaya didapatkan gerakan animasi wajah yang realistik. Pengolahan penjejakan secara sekuensial dengan berpedoman pada prinsip koherensi temporal dapat diterapkan untuk menyederhanakan komputasi sehingga dapat dihasilkan data gerakan yang koheren secara temporal. Data gerak tersebut supaya mampu secara adaptif diterapkan pada beragam model yang berlainan bentuk, maka diperlukannya sebuah metode transfer penanda yang memiliki proses adaptasi antar data sumber gerak dengan data target sehingga mampu memetakan gerak ekspresi wajah secara realistik di setiap model yang dipakai.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka pada penelitian ini merumuskan masalah yang diangkat sebagai berikut:

- a. Belum adanya proses otomatisasi segmentasi area gerak pada wajah yang mampu secara adaptif peka terhadap bentuk wajah model 3D sehingga proses pembentukan area gerak wajah masih dikerjakan manual oleh animator,
- b. Sintesis ekspresi wajah realistik masih didasarkan pada keahlian animator untuk menangani ekspresi dari masing-masing karakter sehingga jika diinginkan adanya duplikasi gerakan yang serupa akan menambah lama waktu produksi,
- c. Transfer ekspresi wajah realistik dari sumber gerakan ke target model 3D berbasis penanda belum memiliki proses adaptasi antar data sumber gerak dengan data target secara otomatis sehingga tidak mampu memetakan gerak ekspresi wajah secara realistik di setiap model yang dipakai secara langsung.

1.3 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Berdasarkan permasalahan yang telah dijabarkan pada Sub bab 1.2, maka penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

- a. Menghasilkan metode otomatisasi segmentasi area gerak pada wajah yang mampu secara adaptif peka terhadap bentuk wajah model 3D,
- b. Menghasilkan sistem sintesis ekspresi wajah realistik yang berbasis pada titik fitur penanda yang mampu secara langsung beradaptasi dan memetakan perubahan titik fitur penanda pada target berdasarkan pada perubahan titik fitur penanda sumber sehingga mampu mempersingkat waktu produksi gerakan jika diinginkan adanya duplikasi gerakan yang serupa.

Tujuan-tujuan tersebut diharapkan mampu memberikan manfaat penelitian berupa :

- a. Munculnya sistem sintesis ekspresi wajah realistik yang mampu melakukan segmentasi area gerak pada wajah secara otomatis dan adaptif mengikuti bentuk model wajah 3D,
- b. Munculnya sistem sintesis ekspresi wajah realistik yang berbasis pada titik fitur penanda yang mampu secara langsung melakukan duplikasi gerak atau pose dengan teknik *retargeting* pada beragam model wajah 3D.

1.4 Penelitian Sebelumnya

Penggunaan data *motion capture* sebagai data sumber penelitian dilakukan didasarkan pada acuan pergerakan otot wajah dan persendian di tulang tengkorak manusia. Data *motion capture* dipandang telah memiliki kesamaan standar dan dapat dengan mudah diimplementasi ke model wajah 3D. Hal ini yang menjadi alasan bagi Dutreuve, Meyer dan Bouakaz untuk menggunakan data dari hasil *motion capture* (Dutreuve, Meyer, & Bouakaz, 2008). Penelitian Curio dkk menegaskan pentingnya proses penjejakan fitur titik di setiap *frame* khususnya pada saat pemrosesan data fitur titik dengan mengenalkan proses algoritma *Iterative Closest Point* (ICP) pada data *motion capture* (Curio, et al., 2006).

Orvalho, Zacur & Susin pada tahun 2008 mempublikasikan penelitiannya tentang pemindahan *rigging* dan animasi wajah dari satu karakter ke model wajah lainnya dengan batasan pada wajah model seperti manusia berbasis *landmark* dan deformasi *mesh* (Orvalho, Zacur, & Susin, 2008). Sedangkan Li, Weise & Pauly pada tahun 2010 mencoba melakukan pemindahan *rigging* wajah model 3D dengan basis contoh perantara. Keberadaan model perantara berfungsi sebagai pengatur acuan perubahan supaya handal. Selain itu pada tahun yang sama, Dutreuve dkk juga melakukan penelitian yang mengolah pemindahan *rigging* menggunakan prinsip registrasi otomatis dan pemindahan parameter *skinning* berdasarkan titik fitur wajah (Dutreuve L. , Meyer, Orvalho, & Bouakaz, 2010).

Penelitian Dutreuve, Meyer & Bouakaz pada tahun 2009 memperkenalkan penggunaan algoritma *radial basis functions* untuk melakukan transformasi koordinat titik fitur 3D dari satu buah model wajah 3D sebagai sumber ke model wajah 3D lainnya selaku target. Pada tahun 2012, hal serupa dilakukan juga oleh Umenhoffer dkk dengan menambahkan pengujian penerapannya pada kasus pengolahan seketika dan kasus pengolahan detail ekspresi wajah (Umenhoffer & Toth, 2012).

Penelitian yang mengolah data ekspresi wajah realistik dari sumber data *motion capture* diawali dari penelitian Ju dan Lee pada tahun 2008. Penelitian ini mencoba membangkitkan ekspresi wajah yang tersinkronisasi dengan inputan wicara sang aktor menggunakan pendekatan metode *markov random fields* (Ju & Lee, 2008). Lazzeri dkk pada tahun 2015 melakukan penelitian pendahuluan guna mengkaji validasi wajah model karakter humanoid yang ekspresif baik yang mencerminkan ekspresi positif maupun ekspresi negatif. Pada penelitian ini disimpulkan bahwa ekspresi positif lebih mudah dikenali dibandingkan dengan ekspresi negatif (Lazzeri, et al., 2015).

Kwon dan Lee pada tahun 2008 juga mencoba mengolah data *motion capture* untuk menghasilkan gerakan karakter yang memenuhi prinsip *exaggeration* menggunakan hirarki *sub-joint*. Namun data gerak yang digunakan masih terbatas pada data gerak tubuh (Kwon & Lee, 2008). Utsugi dkk pada tahun 2011 mencoba melakukan *rendering* dengan memanfaatkan pengaturan kamera yang sistematis guna menghasilkan gambar aksi yang menarik karena proses render *exaggeration*.

Proses ini dilakukan dengan teknik penggabungan sudut pandang dari beberapa kamera yang dikombinasikan secara perspektif (Utsugi, Naemura, Oikawa, & Koike, 2011). Kwon dan Lee pada tahun 2012 kemudian melanjutkan penelitiannya dengan mengkombinasikan antara prinsip *exaggeration* dengan prinsip *squash-and-stretch* untuk menghasilkan gerakan yang lebih ekspresif. Pengembangannya ini mampu membangkitkan efek *squash-and-stretch* untuk gerakan tubuh karakter dengan mengkombinasikan bentuk umum *exaggeration* dari pose karakter dengan parameter *stretch* yang dihasilkan dari metode *time-wrapping* (Kwon & Lee, 2012).

Pengenalan perubahan dinamik pada kulit wajah, khususnya pada area kerutan di dahi diteliti oleh Dutreve, Meyer dan Bouakaz pada tahun 2009 dengan menggunakan data pose skeletal tengkorak kepala dan peta kerutan wajah. Deformasi pada *mesh* model disimulasikan menggunakan metode *Large-scale Deformation* dan pose referensi yang diimplementasikan pada model wajah manusia 3D (Dutreve, Meyer, & Bouakaz, 2009). Pada tahun 2011, Weise, Bouaziz, Li dan Pauly menggunakan data citra 2D dan peta kedalaman 3D hasil tangkapan kamera stereo *kinect* mencoba melakukan deformasi *mesh* menggunakan *blendshape weights* secara seketika pada model wajah manusia 3D (Weise T. , Bouaziz, Li, & Pauly, 2011).

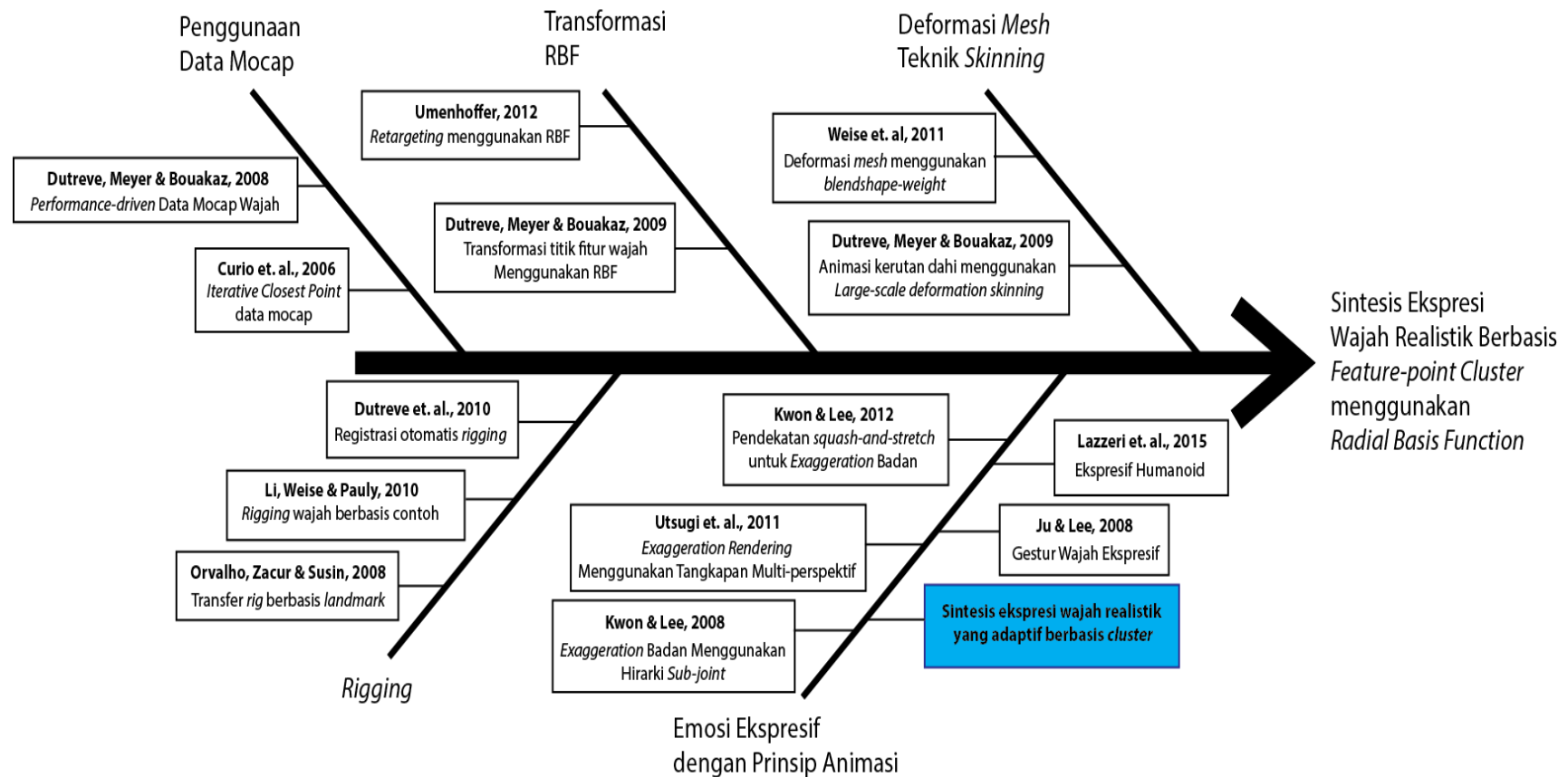
Penelitian-penelitian tersebut secara tabulasi dijabarkan pada Tabel 1.1 sebagai berikut:

Tabel 1.1 Matrik Penelitian Sebelumnya

Topik Penelitian Utama	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Penggunaan Data Hasil <i>Motion Capture</i>	Curio et. al., 2006		Dutreve, Meyer & Bouakaz, 2008							
<i>Rigging</i>			Orvalho, Zacur & Susin, 2008		Li, Weise & Pauly, 2010 Dutreve et. Al., 2010					
Transformasi <i>Radial Basis Function</i>				Dutreve, Meyer & Bouakaz, 2009			Umenhofer, 2012			
Pemrosesan Emosi Ekspresif			Ju & Lee, 2008							Lazzeri et. al., 2015
Sintesis <i>exaggeration</i> pada gerak badan karakter 3D manusia			Kwon & Lee, 2008			Utsugi et. al., 2011	Kwon & Lee, 2012			
Sintesis ekspresi wajah realistik berbasis <i>feature-</i>										

Topik Penelitian Utama	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<i>point cluster</i> menggunakan RBF										
Deformasi <i>Mesh</i> dengan Teknik <i>Skinning</i>				Dutreve, Meyer & Bouakaz, 2009		Weise et. al., 2011				

Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar pengembangan aspek kebaruan di otomatisasi pembentukan area terpengaruh-gerak berdasarkan fitur titik *marker* dengan basis *cluster* di model wajah virtual 3D. Pada Gambar 1.4 dijelaskan bahwa untuk menghasilkan sintesis ekspresi wajah realistik berbasis *feature-point cluster* menggunakan *radial basis function*, terlebih dahulu diperlukan pengolahan data yang berbentuk titik *marker* seperti layaknya data yang didapatkan pada teknologi *motion capture* yang nantinya akan diasosiasikan dengan titik *rigging* pada wajah. Supaya hasil sintesis secara visual bisa mendekati ekspresi yang realistik sesuai dengan sumber ekspresi manusia, maka digunakan transformasi *radial basis function (RBF)* untuk memetakan informasi titik *marker* ke titik *rigging* pada model 3D. Deformasi wajah model 3D akan dihasilkan dengan baik jika ada area gerak yang dapat dihasilkan secara otomatis berdasarkan posisi titik *rigging* di wajah tanpa harus memilihnya secara manual. Oleh karena itu kontribusi utama pada penelitian ini adalah melakukan otomatisasi segmentasi area terpengaruh-gerak pada wajah model 3D dengan basis *cluster* dan kemudian menggunakannya untuk melakukan sintesis ekspresi wajah dari model sumber manusia ke model wajah virtual 3D.



Gambar 1.4. Skema kontribusi penelitian dan kebaruan terhadap penelitian sebelumnya

1.5 Kontribusi dan Orisinalitas Penelitian

Kontribusi yang menjadi orisinalitas dari penelitian ini terdapat pada penggunaan teknik *radial basis function* yang memanfaatkan *feature-point cluster* untuk melakukan sintesis ekspresi wajah realistik ke model wajah 3D.

Feature-point cluster dibangun dengan menerapkan metode *clustering* dengan nilai *feature-point* (fp) terkait dengan posisi titik *marker* dalam sistem *motion capture* berbasis *marker* sebagai pusatnya. Substitusi ini mempermudah proses pengelompokan karena pusat atau *centroid* sudah diketahui, sehingga bisa langsung difokuskan pada proses seleksi keanggotaan masing-masing *cluster* dengan menghitung nilai jarak masing-masing *verteks* ke *centroid* yang terdaftar. Setelah semua area *cluster* terbentuk, maka dilakukan teknik *retargeting* ekspresi wajah realistik dengan cara transformasi titik *marker* dari sumber yang berupa tangkapan kamera menjadi titik fitur gerak atau *rigging* di koordinat target model 3D menggunakan *radial basis function* guna mendapatkan ekspresi hasil secara visual.

1.6 Sistematika Penelitian

Sistematika penulisan buku disertasi ini terdiri dari tujuh bab yang tersusun sebagai berikut :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian atau penjelasan mengenai hal-hal yang mendasari penelitian ini, seperti : latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, penelitian-penelitian sebelumnya dan kontribusi penelitian.

BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini berisi penjelasan kajian pustaka dan dasar teori yang berkaitan tentang: animasi ekspresi wajah 3 dimensi berbasis komputer, prinsip sebuah karya animasi, tahap dan metode dalam memproduksi animasi ekspresi wajah 3 dimensi baik yang bersumber dari publikasi ilmiah maupun buku yang berkaitan dengan materi penelitian ini.

BAB 3 *FEATURE-POINT CLUSTER*

Bab ini berisi uraian mengenai kebaruan yang diusulkan pada penelitian ini, yaitu penjelasan mengenai konsep dan proses pembentukan *feature-point cluster* pada sebuah himpunan titik tersebar.

BAB 4 *RETARGETING PADA ANIMASI WAJAH VIRTUAL 3D BERBASIS DATA MARKER MENGGUNAKAN RADIAL BASIS FUNCTION*

Bab ini membahas tentang proses penangkapan gerak wajah sumber yang dilakukan dengan menggunakan satu kamera dan proses perhitungan transformasi *radial basis function* agar dapat membangun ekspresi yang tepat dan emosi yang natural pada wajah model 3D.

BAB 5 *KESIMPULAN DAN SARAN*

Bab ini membahas tentang kesimpulan yang didapat dari masing-masing tahapan sekaligus memaparkan peluang-peluang pengembangan yang dimungkinkan untuk diterapkan guna penyempurnaan hasil penelitian dan pengembangan yang telah dilakukan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Animasi Ekspresi Wajah 3 Dimensi Berbasis Komputer

Bahasa Mimik seperti yang dikembangkan oleh Hjortsjo pada tahun 1970 merupakan salah satu usaha awal untuk pemetaan ekspresi wajah menurut sistematisasi aktivitas otot wajah yang diamati dari ragam perbedaan ekspresi wajah sang aktor (Hjortsjo, 1970). *Facial Action Coding System* (FACS) dikembangkan oleh Paul Ekman dan Wallace Friesen sebagai pengembangan dari metode bahasa mimik pada tahun 1978. FACS membagi area wajah menjadi 66 *Action Unit* (AU) yang mampu merekonstruksi wajah dengan beraneka ragam ekspresi secara alamiah (Ekman & Friesen, 1978). Sistem FACS saat ini masih sering digunakan oleh para animator untuk merekonstruksi ekspresi wajah dengan memanfaatkan pengendali ekspresi di sistem animasi wajah secara deskriptif.

Teknik pemetaan gerakan dalam sistem pembangkitan animasi ekspresi wajah dapat dipandu berbasiskan penanda atau tidak berbasiskan penanda. Sistem yang dibangun berbasiskan penanda merupakan sistem standar yang telah dikembangkan secara komersial atau sistem yang terpabrikasi. Sistem ini dipakai karena minimnya komputasi yang dipakai dengan mempertimbangkan kecepatan proses yang seketika.

Sistem yang dibangun berbasiskan penanda mempunyai mekanisme penjejakan fitur yang dibangun untuk menjaga kestabilan koherensi temporal dari setiap fitur yang dipakai. Karin Sobottka dan Ioannis Pitas (Sobottka & Pitas, 1997) menggunakan penjejakan fitur metode *template matching*, sehingga setiap fitur yang terdeteksi dalam *frame* selalu dilakukan pencocokan dengan basis data *template* yang telah dipunyai. Namun proses ini membutuhkan perhitungan komputasi yang sangat banyak, sehingga Jong-Gook Ko dkk (Ko, Kim, & Ramakrishna, 1999) mencoba membuat sistem penjejakan dengan komputasi yang ringan untuk mendeteksi dan menjejaki fitur mata, lubang hidung, dan ujung bibir sebagai sebuah fitur wajah. Pendekatan yang digunakannya adalah dengan mengubah nilai piksel yang berada pada level keabu-abuan menjadi nilai biner,

yaitu level intensitas dan melakukan penjejakan menggunakan metode *graph matching*. Hal ini dilakukan untuk memperingan proses dalam penjejakan fitur sehingga sistem dapat berjalan dalam waktu mendekati seketika.

Sedangkan sistem yang dibangun dengan basis tanpa penanda saat ini baru mulai dikembangkan ke arah proses yang seketika dengan bantuan model wajah yang terparameter. Model wajah ini nantinya akan memetakan ekspresi wajah sang aktor sehingga hasil capaiannya akan memiliki detail ekspresi yang menyerupai permukaan wajah aslinya seperti yang dikembangkan oleh Weise bersama teman-temannya (Weise T. , Bouaziz, Li, & Pauly, 2011).

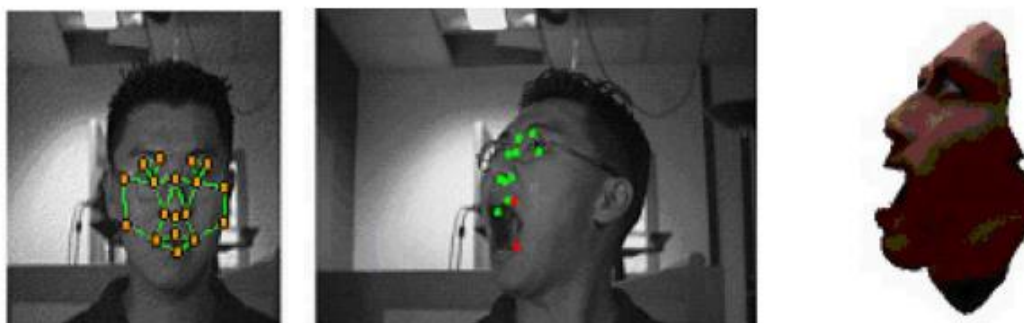
Pengembangan sistem animasi wajah dapat dipandang dalam dua buah aktivitas yang saling bebas, yaitu proses pengembangan parameterisasi kendali serta tampilan antarmuka penggunaannya, dan pengembangan teknik implementasi animasi wajah berdasarkan parameterisasinya (Parke & Waters, 2008). Teknik yang sangat memegang peranan penting dalam proses animasi wajah adalah proses kontrol pengendali yang nantinya akan menjadi acuan proses pembangkitan animasi. Semakin baik proses pengontrolan kendali dari setiap parameter, maka semakin akurat proses pembangkitan animasi wajah yang natural.

Secara historis animasi ekspresi wajah yang dibangkitkan dengan berbantuan komputer diawali dari penelitian Frederic I. Parke pada tahun 1972 (Parke F. , 1972). Sejak itu munculah pengembangan penelitian yang mengarah pada pembangkitan model dan animasi ekspresi wajah realistik. Perkembangannya terkini mengarah pada proses permodelan wajah dan *rendering* seketika.

Dikarenakan kompleksitas anatomi wajah manusia dan perbedaan penampakan wajah yang terjadi akibat perubahan ekspresi dan emosional seseorang, maka sampai saat ini pengembangan penelitian di bidang ini masih terus berkembang. Klasifikasi permodelan wajah dan teknik animasi sangat sulit dibangun dikarenakan kurangnya batasan nyata antar metode dan bahkan ada yang melakukan penggabungan beberapa metode menjadi satu demi kesempurnaan sistem yang dibangun.

2.2 Animasi Wajah Berdasarkan Data *Motion Capture*

Kesulitan pada pengontrolan animasi wajah mendorong ke pendekatan model kendali acuan tampil dimana aktor manusia yang terdeteksi mengatur animasi. Pemrosesan video secara seketika mengijinkan animasi interaktif saat sang aktor mengamati animasi mereka membuat berdasarkan gerakannya dan ekspresi yang dibuat. Akurasi penjejakan titik fitur atau tepian sangat penting untuk dijaga konsistensi dan kualitas animasi. Sangat sering dijumpai penjejakan pergerakan fitur 2D atau 3D disaring atau diubah untuk membangkitkan data gerak yang diperlukan untuk mengontrol sistem animasi yang khusus. Data gerakan tersebut dapat digunakan secara langsung membangkitkan animasi wajah (Essa, Basu, Darrell, & Pentland, 1996) atau untuk mempengaruhi AUs dari FACS pada pembangkitan ekspresi wajah. Pada Gambar 2.1 ditunjukkan animasi yang dikendalikan dari sistem penjejakan fitur seketika tanpa menggunakan penanda di wajah sumbernya.



Gambar 2.1 Penjejakan seketika dijalankan tanpa penanda di wajah menggunakan sistem penjejakan eyematic, Inc. (Essa, Basu, Darrell, & Pentland, 1996)

Penanda warna dicatkan pada wajah atau bibir (Sera, Morishma, & Terzopoulos, 1996) sangat sering digunakan sebagai pembantu penjejakan ekspresi wajah atau pengenalan pengucapan kata dari video sekuen. Namun penandaan pada wajah sangat membosankan. Kepercayaan kepada penanda membatasi cakupan informasi geometri yang didapat dari fitur. *Optical flow* (Horn & Schunck, 1981) dan spatio-temporal menormalkan korelasi pengukuran (Darrell & Pentland, 1993) yang membentuk penjejakan fitur natural dan meniadakan kebutuhan penanda di wajah (Essa, Basu, Darrell, & Pentland, 1996), Chai et al. (J. Chai, 2003) mengusulkan sebuah teknik *data-driven* untuk menggeser gangguan, penjejakan 2D

yang berkualitas buruk dari sinyal video menjadi animasi wajah 3D berkualitas baik berdasarkan proses pendahuluan pengolahan dari basis data gerak wajah. Batasan pada pendekatan ini adalah dibutuhkannya basis data gerak wajah yang sudah dilakukan pemrosesan awal dan keberhasilannya ditentukan pada kesesuaian antara data orang yang sudah direkam di basis data dan model wajah target. Zhang et al. (Zhang, Snavely, Curless, & Seitz, 2004) mengusulkan sebuah algoritma penjejakan stereo basis pada *space-time* untuk membangun model wajah 3D dari video sekuen yang menjaga titik korespondennya melewati keseluruhan sekuen tanpa menggunakan sebuah penanda.

Saat ini produksi animasi yang berkualitas menggunakan data tangkapan gerak atau *motion capture* 3D data. Data *motion capture* menyajikan data dalam bentuk *array* dari data tangkapan kamera dan digunakan untuk membangun ekspresi di area wajah, seperti tampak pada Gambar 2.2. Meskipun sistem optik ini sangat sulit untuk digunakan dan mahal, namun data yang direkonstruksikan memberikan ketepatan waktu dan informasi gerak. Sekali data siap, animasi wajah dapat dibuat dengan mengolah struktur otot (Choe, Lee, & Ko, 2001) atau *blendshapes* (Deng, Chiang, Fox, & Neumann, 2006).



Gambar 2.2 Pengambilan data *motion capture*(kiri) dan implementasinya di model wajah 3D(kanan) (Curio, et al., 2006)

2.3 Titik Fitur Wajah Berdasarkan Standar *MPEG-4*

Semakin banyaknya aplikasi animasi wajah diterapkan ke bentuk *MPEG-4* standar, yaitu sebuah standar kompresi karya multimedia. *MPEG-4* menganimasikan sebuah model wajah 3D dengan *Face Definition Parameter* (FDP)

dan *Facial Animation Parameter* (FAP). FDP membungkus informasi untuk membangun geometri wajah 3D dan FAP mengodekan parameter gerak dari titik fitur kunci di area wajah. *Face Animation Parameter Units*(FAPU) yang mengatur skala FAP supaya cocok di model wajah apapun yang didefinisikan sebagai pecahan kunci fitur wajah, seperti jarak antara dua mata.

Pada standar animasi wajah MPEG-4, total terdiri dari 84 *feature points*(FP) yang spesifik. Gambar 2.3 menggambarkan bagian dari letak titik fitur MPEG-4 di wajah. Setelah membuang titik fitur yang tidak terpengaruh FAP, 68 FAP dikategorikan dalam grup seperti tampak pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Grup FAP di MPEG-4

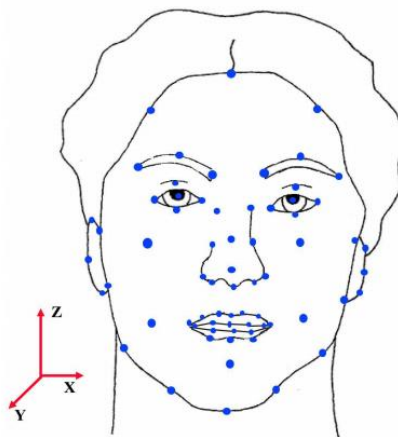
Grup	Jumlah FAP
Viseme dan ekspresi	2
Bibir, dahi dan rahang	26
Mata	12
Alis	8
Pipi	4
Lidah	5
Gerakan kepala	3
Hidung	4
Telinga	4

Sumber: Parke & Waters, 2008

Sebagian besar grup FAP adalah parameter kualitas bawah sejak secara spesifik menunjukkan banyaknya FP yang dipindahkan. Satu buah grup FAP(*visemes* dan *expressions*) memperhitungkan parameter tingkat tinggi dikarenakan parameter ini tidak secara spesifik tepat. Sebagai contoh: deskripsi tekstual digunakan untuk menggambarkan ekspresi. Seperti halnya animasi wajah terekonstruksi bergantung pada implementasi individu animasi wajah MPEG-4.

Penelitian sebelumnya yang membahas tentang animasi wajah basis MPEG-4 memfokuskan diri pada deformasi model wajah 3D berbasis pada titik fitur MPEG-4 (Escher, Pandzic, & Thalmann, 1998) dan membangun sistem dekoding animasi wajah basis MPEG-4 (Abrantes & Pereira, 1999). Sebagai contoh, Escher et al. (Escher, Pandzic, & Thalmann, 1998) mengubah model wajah umum menggunakan metode pendekatan free-form deformation untuk membuat

animasi wajah MPEG-4. Kshirsagar et al. (Kshirsagar, Garchery, & Thalmann, 2000) mengusulkan teknik baru untuk melakukan deformasi wajah berbasis titik fitur yang efisien menggunakan masukan titik fitur MPEG-4. Pada pendekatan ini, gerak setiap titik fitur MPEG-4 disebarkan ke titik-titik tetangganya yang terdapat di model wajah dan pergerakan dari setiap titik yang bukan titik fitur adalah penjumlahan total dari setiap sebaran pergerakan yang ada. Dalam perkembangannya telah ada beragam sistem dekoding animasi wajah yang berbasis MPEG-4 (Abrantes & Pereira, 1999) dan kerangka kerja yang digunakan untuk aplikasi web dan perangkat bergerak (Pandzic, 2002).



Gambar 2.3 Bagian titik fitur wajah yang menjadi standar di MPEG-4

2.4 Penulangan Gerak Wajah (*Rigging*)

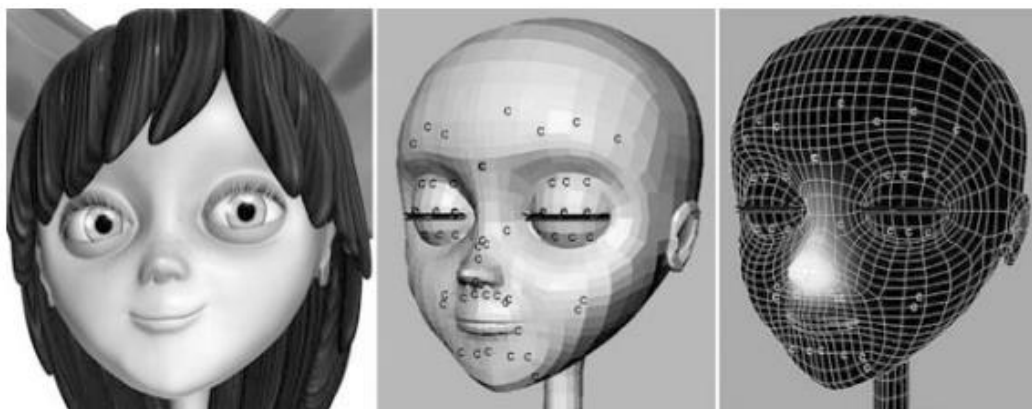
Pekerjaan seorang animator adalah untuk memanipulasi kendali model supaya wajah tampak hidup. Perangkat animasi interaktif terdiri dari alat kendali gerakan dan alat penayang gerakan. *Facial rigging* adalah proses pembuatan kendali animasi untuk model wajah dan antar muka animator yang mengendalikannya. Salah satu contoh awal adalah sistem yang dikembangkan oleh Hanrahan dan Sturman yang mengijinkan animator membuat hubungan fungsional antara perangkat input interaktif dengan parameter kendali (Hanrahan & Sturman, 1985).

Sebagai contoh, di sistem ini sang animator bisa mendefinisikan kaitan fungsi antara nilai inputan dan parameter kendali. Nilai inputan RSMILE akan

mempengaruhi parameter ujung kanan mulut naik atau turun sesuai nilai yang dimasukkan. Sistem ini menyediakan fleksibilitas untuk mendefinisikan nilai fungsi keterkaitan untuk dapat menghasilkan nilai kendali.

Setiap titik acuan gerak yang menjadi pusat kendali area gerak pada tahap ini akan juga menjadi pusat dari sebuah *cluster* yang memiliki nilai bobot di setiap titiknnya. Sebuah *cluster* adalah grup titik yang berhubungan. *Cluster* mengijinkan sekumpulan titik permukaan wajah untuk di translasi, rotasi, dan skala relatif terhadap lokasi asal *cluster*. Efek transformasi pusat *cluster* terhadap titik-titik anggota *cluster* ditentukan oleh nilai bobot. Titik yang berbeda di *cluster* akan mempunyai bobot yang berbeda pula. Bobot titik akan mengakibatkan efek transformasi *cluster* yang bervariasi diantara titik-titik anggota *cluster*. Semakin dekat dengan pusat *cluster*, maka titik anggota *cluster* akan terpengaruh makin kuat. Sehingga dengan adanya area *cluster* yang memiliki bobot ini, maka proses deformasi dapat terkendalikan dengan baik.

Pada Gambar 2.4 ditunjukkan pada bagian kanan adalah area *cluster* yang mempunyai titik pusat di ujung hidung sang karakter. Nilai putih menandakan area yang memiliki bobot maksimum, sedangkan warna hitam berarti memiliki bobot nol. Sedangkan nilai keabu-abuan bobotnya diantara nilai nol dengan nilai maksimumnya. Pada gambar tengah ditunjukkan lokasi pusat *cluster* yang berkorelasi dengan titik fitur animasi. Setiap pusat *cluster* bertanggung jawab atas kendali fitur wajah yang berkorelasi dengannya berdasarkan letak dan bobotnya.



Gambar 2.4 *Facial rigging*(tengah) dari model 3D(kiri) yang ditentukan area terpengaruh-geraknya di area hidung secara manual(kanan) (Parke & Waters, 2008)

2.5 Transformasi *Radial Basis Function*

Transformasi menggunakan metode *radial basis function* biasanya diimplementasikan ke dalam teknik pemindahan gerak *retargeting*. *Retargeting* mengusung ide penggunaan ulang animasi karakter yang serupa, sehingga dapat memperingan kerja animator. Teknik ini disajikan dengan menarik dan menggunakan data gerakan 2D berbasis visual berkualitas rendah untuk menganimasikan wajah dengan data perhitungan 3D *motion capture* wajah berkualitas baik (Chai, Xiao, & Hodgins, 2003). *Radial Basis Functions* (RBF) (Powell, 1987) digunakan untuk mengadaptasi vektor gerak sebuah *mesh* ke yang lainnya (Noh & Neumann, 2001).

Metode transformasi sebuah animasi yang diperoleh dari animasi wajah 3D atau rekaman video 2D berbasis titik fitur dan teknik *retargeting* (Dutreve, Meyer, & Bouakaz, 2008). *Radial basis function* sering digunakan untuk permasalahan interpolasi sebaran data seperti perkiraan permukaan dan simulasi fluida.

Secara bertahap alur *retargeting*, Gambar 2.5, dimulai dari tahap inialisasi dengan terlebih dahulu mendefinisikan wajah sumber pada posisi netral/diam beserta titik fitur yang dipakai, dalam hal ini adalah titik *marker* pada wajah manusia. Pada tahap ini pula ditentukan korelasi titik fitur sumber dengan targetnya, secara manual dipilih titik *rigging* dalam kondisi netral/diam dan kedua data tersebut pada proses inialisasi dinamakan sebagai data S_0 dan T_0 . Data tersebut kemudian akan dipakai pada perhitungan transformasi RBF sehingga jika ada perubahan posisi titik *marker* yang di simpan sebagai nilai S_i hasil dari penjejakan titik *marker* maka dapat diprediksi hasil perubahannya di titik target sebagai nilai T_i dan divisualisasikan dengan deformasi wajah model 3D.

Persamaan *radial basis function* yang dipakai mengacu pada Persamaan 2.1 dan hasil *retargeting* dihasilkan dari pengaruh bobot ω_i yang didapatkan pada proses pembelajaran data S_0 dan T_0 .

$$y(x) = \sum_{i=1}^N \omega_i \phi(\|x - x_i\|) \quad (2.1)$$

Dimana ϕ adalah fungsi radial yang nilainya tergantung pada jarak dari asal mula (pada kasus ini nilai x_i). Pada prakteknya terdapat banyak fungsi radial yang dapat digunakan, saat ini yang dipilih adalah fungsi multikuadratik(2.2).

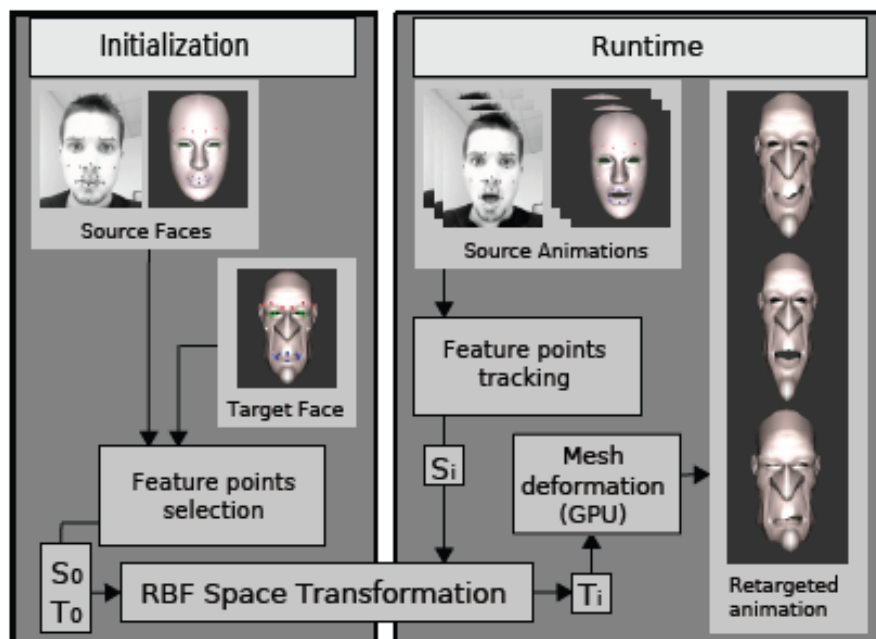
$$\phi(r) = \sqrt{1 + (\epsilon r)^2} \quad (2.2)$$

Setiap komponen parameter target mendefinisikan himpunan fungsi radial, sehingga keterkaitan bobot ω_i harus dihitung terlebih dahulu.

Pada Persamaan 2.1, jumlah fungsi basis N adalah jumlah sampling yang didefinisikan di awal, x_i adalah konfigurasi data sumber dari sampel i . Konfigurasi target $y_i = y(x_i)$ akan mendefinisikan titik kontrol himpunan fungsi interpolasi. Bobot w_i dapat dihitung dengan menyelesaikan sistem persamaan linier(2.3).

$$T = H \cdot W \quad (2.3)$$

Dengan parameter $H_{ij} = \phi(\|x_j - x_i\|)$, $W_i = w_i$ dan $T_i = y_i$



Gambar 2.5 Alur *retargeting* berbasis RBF (Dutreve, Meyer, & Bouakaz, 2008)

2.6 Facial Action Coding System(FACS)

Facial Action Coding System (FACS) adalah sebuah deskripsi pergerakan otot wajah dan rahang/lidah yang diturunkan dari analisis anatomi wajah (Ekman & Friesen, 1978). FACS terdiri dari 44 *action unit* (AUs) dasar. Kombinasi *action unit* bebas menghasilkan ekspresi wajah. Contohnya: kombinasi AU1 (*Inner brow*

raiser), AU4 (*brow raiser*), AU15(*Lip Corner Depressor*), dan AU23(*lip tightener*) membentuk ekspresi sedih. Tabel contoh AU dan ekspresi dasar yang dihasilkan dari AU dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

Secara sederhana, FACS banyak digunakan dengan basis otot atau pendekatan berbasis otot semu. Metode animasi menggunakan model otot untuk mengatasi batasan interpolasi dan menghasilkan variasi ekspresi wajah yang luas. Permodelan otot berbasis fisik secara matematis menjabarkan atribut dan perilaku kulit manusia, tulang, dan sistem otot. Secara berlainan, model otot semu meniru dinamisasi kulit manusia dengan deformasi geometris secara heuristik. Selain popularitasnya, ada juga beberapa keuntungan menggunakan FACS (Essa, Basu, Darrell, & Pentland, 1996). Pertama, AUs murni pola lokal sementara *actual facial motion* sangat jarang terlokalisasi. Kedua, FACS menawarkan deskripsi gerak spasial tetapi bukan komponen temporal. Pada sumber temporal, efek koartikulasi hilang di sistem FACS.

Tabel 2.2 Contoh *action units* wajah tunggal

AU	FACS Name	AU	FACS Name	AU	FACS Name
1	Alis dalam naik	12	Sudut kelopak mata tertarik	2	Alis luar naik
14	Lesung pipi	4	Alis turun	15	Sudut bibir tertekan
5	Bagian atas kelopak mata terangkat	16	Bibir bawah tertekan	6	Pipi naik
17	Dahi naik	9	Hidung berkerut	20	Bibir meregang
23	Bibir menutup kencang	10	Bibir atas naik	26	Rahang turun

Sumber: Ekman & Friesen, 1978

Tabel 2.3 Contoh himpunan *action units* untuk ekspresi dasar

Ekspresi Dasar	Keterlibatan <i>Action Unit</i>
Terkejut	AU1, 2, 5, 15, 16, 20, 26
Takut	AU1, 2, 4, 5, 15, 20, 26
Marah	AU2, 4, 7, 9, 10, 20, 26
Senang	AU1, 6, 12, 14
Sedih	AU1, 4, 15, 23
Jijik	AU9, 15, 16

Sumber: Ekman & Friesen, 1978

2.7 Deformasi *Mesh* dengan Teknik *Skinning*

Deformasi secara langsung didefinisikan pada permukaan *mesh* wajah yang sering menghasilkan animasi berkualitas. Hal ini mengabaikan anatomi wajah dan struktur otot yang ada. Sehingga fokusnya hanyalah pada pembuatan variasi ekspresi wajah dengan memanipulasi *thin-shell mesh*. Kategori ini meliputi *morphing* antara model berbeda dan otot semu tersimulasi pada bentuk *splines* (Viad & Yahia, 1992), kawat (Singh & Fiume, 1998), atau *free form deformations* (Kalra, Mangili, Thalmann, & Thalmann, 1992).

2.7.1 Perubahan Bentuk 2D dan 3D (*Morphing*)

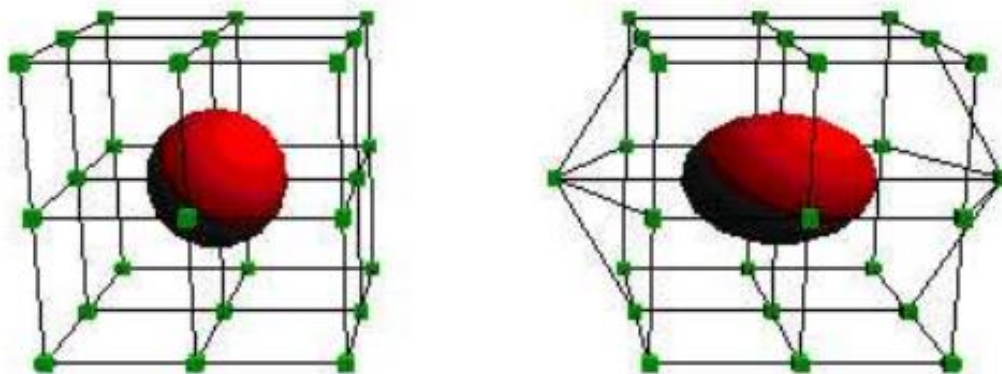
Perubahan bentuk memberikan efek sebuah perubahan antara 2 target citra atau model. Sebuah citra 2D berubah meliputi perubahan antara titik-titik yang berhubungan dengan citra tujuan dan secara simultan berubah selayaknya *cross dissolve*. Secara tipikal, titik-titik yang berhubungan tersebut dipilih secara manual supaya sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Beier dan Neely (Beier & Neely, 1992) menunjukkan *morphing* 2D antara dua citra yang secara manual dipilih fitur yang berhubungan berupa garis. Fungsi *warp* berdasarkan tempat yang terpengaruh dan sekitarnya. Pendekatan realistik dari cara ini membutuhkan interaksi manual yang berupa pewarnaan, pemilihan fitur koresponden, pengaturan parameter *warp* dan *dissolve*. Variasi di sudut pandang citra tujuan atau fitur untuk melengkapi pemilihan korespondensi fitur. Gerakan kepala sangat sulit di sintesis jika fitur tujuan tertutup. Untuk mengatasi hal ini, Pighin et al. (Pighin, Auslander, Lischinski, Salesin, & Szeliski, 1997) mengkombinasikan 2D *morphing* dengan transformasi 3D model geometri. Mereka menganimasikan kunci animasi ekspresi wajah dengan interpolasi geometri 3D ketika citra mulai *morphing* sesuai teksturnya. Pendekatan ini mendokumentasikan realisme *viewpoint* yang bebas, walaupun animasi masih terbatas untuk interpolasi antara kunci ekspresi wajah telah ditentukan di awal.

Metode *morphing* 2D dan 3D dapat menghasilkan ekspresi wajah yang baik dan berkualitas, namun mempunyai keterbatasan yang serupa dengan pendekatan interpolasi. Pemilihan titik yang berhubungan di citra tujuan masih dikerjakan secara manual dan tergantung pada sudut pandang serta tidak

mempunyai bentuk umum untuk wajah yang berbeda. Selain itu sudut pandang animasi juga menjadi terikat ke citra tujuan yang spesifik saja.

2.7.2 Deformasi Bentuk Bebas (*Free Form Deformation*)

Deformasi bentuk bebas mengubah obyek volumetrik dengan mengubah titik kendali di dimensional kisi kubik 3 dimensi (Sederberg & Parry, 1996). Secara konsep, obyek fleksibel ditanamkan pada sebuah kisi kubik kendali 3D yang berbentuk grid dan tersusun atas titik-titik kendali, Gambar 2.6. Kotak kisi kubik kendali mampu menyesuaikan perubahan yang dikerjakan pada obyek didalamnya sehingga obyek yang diubah tetap berada di dalam kisi kotak tersebut.



Gambar 2.6 Cara kerja *Free Form Deformation* (FFD). (Sederberg & Parry, 1996)

Extended Free Form Deformation (EFFD) (Coquillart, 1990) mengizinkan perluasan titik kisi kendali kotak menjadi bentuk struktur kisi silinder. Bentuk kisi silinder dipandang mempunyai fleksibilitas tinggi untuk perubahan bentuk dibandingkan bentuk kisi kotak. *Rational Free Form Deformation* (RFFD) menggunakan faktor bobot untuk setiap titik kendali dan menambahkan tingkat derajat kebebasan pada perubahan deformasi. Oleh karena itu, deformasi dimungkinkan dengan pengubahan faktor bobot dibandingkan mengubah posisi titik kendali. Ketika semua bobot bernilai satu, maka RFFD berubah menjadi FFD. Keuntungan menggunakan FFD (EFFD, RFFD) dibandingkan kendali *Abstract Deformation* permukaan adalah transisi bentuk tidak tergantung secara spesifik pada permukaannya (Thalmann & Thalmann, 1996).

Pemindahan titik kontrol berasosiasi ke perlakuan model fisik otot. Jika dibandingkan dengan teori Waters tentang *physically based model* (Waters, 1987), perubahan posisi atau bobot titik kendali sangat intuitif dan mudah dibandingkan mengubah vektor otot yang digambarkan dengan luasan area pengaruh. Namun FFD (EFFD, RFFD) tidak menyediakan simulasi yang tepat dari kondisi otot dan kulit yang sesungguhnya. Selanjutnya, sejak FFD (EFFD, RFFD) berbasis pada deformasi permukaan, perubahan volumetrik yang terjadi di otot tidak diperhitungkan.

2.7.3 Otot Semu *Spline*

Model poligonal Albeit tentang wajah sering digunakan dalam beragam aplikasi dan penelitian yang dikembangkan. Model ini gagal untuk memperkirakan kehalusan atau fleksibilitas wajah manusia secara presisi. Model poligonal tidak mampu berubah secara baik di area dinamis, dan titik planar tidak dapat diubah menjadi permukaan pahatan tanpa melakukan percabangan.

Model wajah yang ideal memiliki representasi permukaan yang mendukung deformasi fleksibel dan halus. Model otot *spline* menawarkan solusi yang logis. *Splines* biasanya sampai kontinu C^2 oleh karena itu tiap potongan permukaan dijamin akan berubah secara halus dan mengizinkan deformasi terlokalisasi pada permukaan. Selain itu, transformasi sumbu didefinisikan dengan transformasi himpunan titik kendali dibandingkan semua vertek mesh sehingga mengurangi kompleksitas komputasi.

Beberapa animasi berbasis *spline* dapat ditemukan pada (Viad & Yahia, 1992). Pixar menggunakan potongan kecil *bicubic Catmull-Rom spline* ke model *Billy*, si bayi, di tokoh film animasi *Tin Toy*, dan menggunakan varian dari permukaan cabang Catmull-Clark (Catmull & Clark, 1978) ke tokoh *Gery*, seorang tokoh karakter manusia di film pendek *Geri's game*. Teknik ini diadaptasi ke model lipatan tajam di permukaan atau di perpotongan antar permukaan (Derose, Kass, & Truong, 1998). Deskripsi detail dari cabang permukaan *Catmull-Rom splines* dan *Catmull-Clark* dapat dilihat pada publikasi (Catmull & Clark, 1978). Eisert dan Girod (Eisert & Girod, 1998) menggunakan segitiga *B-splines* untuk memperbaiki kekurangan yang tidak mampu diatasi oleh *B-splines* model klasik. *B-splines* klasik

tidak mampu memperbaiki area kurva secara lokal sejak didefinisikan pada topologi segiempat.

Model hirarki *spline* mengurangi banyaknya titik kendali yang tidak penting. Wang et al. (Wang & Forsey, 1994) menunjukkan sistem model hirarki *spline* yang terintegrasi dengan simulasi otot basis deformasi permukaan. *Bicubic B-splines* menawarkan kehalusan dan fleksibilitas yang sulit didapatkan dengan penerapan model poligonal klasik. Kekurangan dalam penggunaan *naive B-splines* untuk permukaan kompleks menjadi berkurang, bagaimanapun juga deformasi dibutuhkan untuk lebih baik dari pada resolusi potongan kecil. Supaya menghasilkan resolusi potongan kecil yang lebih baik, digunakanlah seluruh baris atau kolom dari permukaan yang dicabangkan. *Splines* hirarki memberikan perbaikan lokal dari permukaan *B-spline* dan potongan kecil yang baru hanya ditambahkan diantara area khusus. *B-Spline* hirarki sangat ekonomis dan menjadi cara untuk mewakili permukaan *spline* serta mendapatkan kecepatan *render* yang tinggi. Otot yang berpasangan dengan permukaan *hierarchical spline* dapat membuat permukaan kulit menonjol dan memberikan variasi ekspresi wajah.

Pendekatan teknik animasi wajah yang paling umum adalah *linear weighting* dengan model *blendshape* (Deng, Chiang, Fox, & Neumann, 2006), dan *linear blend skinning* berbasis rangka (Lewis, Cordner, & Fong, 2000). Pada teknik ini animator membuat bentuk acuan dan secara linier dilakukan penggabungan dengan bentuk tersebut untuk menghasilkan sebuah aliran gerakan. Namun hal ini membutuhkan waktu yang lama dikarenakan ekspresi manusia sangatlah kompleks dan beragam. *Linear blend skinning* juga dikenal sebagai teknik *skeleton subspace*, yaitu proses penyatuan *mesh* wajah ke kerangka tulang. Setiap titik diasosiasikan dalam sebuah himpunan titik sendi yang terpengaruh dengan nilai bobotnya. Perubahan bentuk *mesh* terjadi jika setiap titik secara konstan berubah sesuai dengan pengaruh titik-titik yang berhubungan berdasarkan bobot perubahan setiap titiknya. Metode *skinning deformation* masih merupakan metode paling populer yang digunakan pada praktek animasi karakter secara *real-time* dikarenakan kesederhanaan proses dan efisiensi kerja komputasinya.

Penganimasian *mesh* melibatkan teknik *mesh deformation*. Batasan yang diacu pada konteks ini adalah: pertama, proses komputasi harus dapat dilakukan

secara singkat atau mendekati *real-time*. Dan kedua, perubahannya harus dipandu oleh deformasi beberapa titik fitur dikarenakan metode yang diacu melandasi proses *retargeting* animasi dengan beragam sumber yang dimungkinkan, seperti penjejukan secara 2D/3D dan animasi 3D. Berdasarkan hal ini, maka digunakanlah teknik deformasi berbasis kerangka/skeletal: *linear blend skinning*.

Linear blend skinning(LBS) mengubah *mesh* menurut transformasi lokal dari rangka tulang. Untuk mengadaptasi teknik *skinning deformation* dengan perubahan letak titik fitur, maka dipertimbangkan juga posisi titik fitur sebagai sebuah titik sendi gerak. Bobot untuk setiap titik didefinisikan $\sum w_i = 1$ dengan bobot tulang ke- i $w_i \in [0,1]$. Bobot dengan nilai 0 berarti bahwa titik fitur tersebut tidak mempengaruhi titik vertek pada *mesh* tersebut, sedangkan jika bobot bernilai 1 berarti bahwa titik vertek pada *mesh* tersebut dipengaruhi hanya oleh titik fitur itu saja. Posisi vertek \vec{v} pada *frame* f didefinisikan oleh:

$$\vec{v}_f = \vec{v}_0 + \sum_{i=1}^N w_i \cdot \vec{d}_{if} \quad (2.4)$$

Nilai N adalah banyaknya titik fitur dan \vec{d}_{if} adalah perubahan letak titik fitur ke- i pada *frame* f .

2.8 Pemrosesan Interpolasi Bentuk *Blendshape*

Interpolasi bentuk adalah teknik yang sering dipakai pada praktek animasi ekspresi wajah. Model *blendshape* menyederhanakan penjumlahan total bobot linier yang bersesuaian dengan bentuk primitif *shape*.

$$v_j = \sum w_k b_{kj} \quad (2.5)$$

Pada persamaan (2.5) v_j adalah titik vertek ke- j hasil animasi model, w_k adalah nilai bobot percampuran, dan b_{kj} adalah nilai vertek ke- j dari *blendshape* ke- k . Penjumlahan total bobot dapat diaplikasikan ke titik model poligonal, atau ke titik kendali model *spline*. Bobot w_k dikendalikan oleh animator dalam bentuk *slider* perbobotnya atau dapat diperoleh secara otomatis dengan penerapan sebuah algoritma (Deng, Chiang, Fox, & Neumann, 2006). Metode ini sampai sekarang masih banyak digunakan dalam beberapa proyek film animasi, seperti: Stuart Little, Star Wars, dan Lord of the Rings, bahkan beberapa perangkat lunak komersial animasi seperti Maya dan 3D Studio Max mengadopsi metode ini. Contoh

sederhana dapat dilihat pada Gambar 2.7, yaitu proses interpolasi antara dua *keyframes* saat posisi ekstrem pada interval waktu tertentu.

Interpolasi linier sering dipakai untuk penyederhanaan (Bergeron & Lachapelle, 1985) (Pighin, Hecker, Lischinski, Szeliski, & Salesin, 1998), namun sebuah fungsi interpolasi cosinus (Waters & Levergood, 1993) atau variasi lainnya seperti *spline* yang mampu menunjukkan terjadinya efek percepatan dan perlambatan saat diawal ataupun diakhir animasi. Ketika ada empat *keyframes* yang terlibat, bukannya dua, interpolasi bilinier menghasilkan banyak variasi ekspresi wajah daripada interpolasi linier (Parke F. , 1974). Interpolasi bilinier jika digabungkan dengan perubahan *morphing* citra secara simultan akan menghasilkan cakupan perubahan ekspresi wajah yang luas (Arai, Kurihara, & Anjyo, 1996).



Gambar 2.7 Interpolasi linier dilakukan pada *blend shapes*. Kiri: pose netral, kanan: pose dengan bentuk mulut “A”, dan tengah: hasil interpolasinya. (Lewis, Corder, & Fong, 2000)

Citra hasil interpolasi didapat dari pengubahan parameter fungsi interpolasi. Interpolasi geometri secara langsung mengubah posisi titik 2D atau 3D dari *mesh* wajah ketika parameter fungsi kendali interpolasi tidak secara langsung memindahkan titik. Contoh: Sera et al. (Sera, Morishima, & Terzopoulos, 1996) melakukan interpolasi linier parameter kontraksi otot, bukannya posisi titik, untuk mendapatkan animasi mulut dalam berbicara.

Pengembangan terkini dari metode ini mencoba meningkatkan efisiensi produksi gerak otot berbasis animasi *blend shape* (Choe & Ko, 2001) (Sifakis, Neverov, & Fedkiw, 2005). Metode *pose space deformation*(PSD) yang dikenalkan oleh Lewis et al. (Lewis, Corder, & Fong, 2000) mampu menghasilkan kerangka kerja umum *example-based interpolation* yang dapat digunakan untuk animasi

wajah metode *blendshape*. Pada penelitiannya, deformasi permukaan wajah diperlakukan sebagai sebuah fungsi himpunan parameter abstrak, seperti: {tersenyum, alis naik,...}, dan sebuah permukaan baru yang dihasilkan oleh interpolasi data yang tersebar.

Meskipun interpolasi sangat cepat dan mampu menghasilkan animasi wajah, kemampuannya untuk membentuk konfigurasi wajah realistik yang bercakupan luas tidak dapat dilakukan. Kombinasi gerak wajah yang bebas sulit dihasilkan dan *non-orthogonal blend shapes* saling mempengaruhi masing-masing, sehingga animator harus kembali dan memperbaiki nilai bobot *blend shapes*. Lewis et al. (Lewis, Mooser, Deng, & Neumann, 2005) mempresentasikan teknik antarmuka pengguna untuk otomatisasi pengurangan pengaruh *blendshape*. Deng et al. (Deng, Chiang, Fox, & Neumann, 2006) mempresentasikan teknik otomatisasi pemetaan data motion capture yang langka untuk perancangan awal model wajah *blendshape* 3D dengan terlebih dahulu dilakukan pembelajaran *radial basis function* berbasis regresi.

2.9 Pendekatan Khusus Permodelan Wajah 3D

Permasalahan penting di animasi wajah adalah permodelan manusia yang spesifik per individunya. Sebuah pemindai 3 dimensi, *digitizer*, atau disparitas kamera stereo dapat mengukur koordinat tiga dimensi. Model yang didapatkan dari proses tersebut terkadang tidak cocok dengan animasi wajah yang diinginkan. Informasi tentang struktur wajah hilang dan kemunculan pengganggu atau *noise* mengakibatkan munculnya artefak yang mengganggu model yang terbentuk. Sehingga proses pembersihan data awal sangat diperlukan untuk didatakannya data yang sesuai.

Pendekatan permodelan khusus perorangan memiliki langkah yang cukup sulit dikarenakan keharusannya untuk menyediakan bentuk umum *mesh* animasi dengan segala struktur dan informasi animasi. Model umum ini disesuaikan atau dideformasi ke *mesh* geometri yang spesifik ke bentuk seseorang supaya didapatkan model animasi yang bersifat lebih personal. Pencocokan geometri juga memungkinkan pemindahan tekstur jika dilakukan dengan *mesh* yang terukur dan bersesuaian. Jika model umum mempunyai lebih sedikit poligon daripada *mesh*

yang diukur, proses penipisan dilakukan secara implisit pada saat proses pencocokan.

Permodelan khusus perorangan dan pencocokan menggunakan pendekatan yang variatif, seperti: interpolasi data tersebar (Pighin, Hecker, Lischinski, Szeliski, & Salesin, 1998) dan proyeksi ke koordinat silinder yang tergabung dengan fungsi medan Laplacian positif (Lee, Terzopoulos, & Waters, 1995). Beberapa metode menerapkan proses pencocokan otomatis, tetapi sebagian besar masih menggunakan intervensi manual.

Radial basis function mampu melakukan pendekatan atau interpolasi secara halus ke bentuk permukaan yang sulit (Powell, 1987) seperti bentuk wajah manusia. Beberapa pendekatan mengubah bentuk umum ke bentuk khusus dengan menggunakan teknik interpolasi data tersebar dengan acuan basis pada *radial basis function*.

Keuntungan pendekatan ini adalah: pertama, perubahan bentuk tidak membutuhkan jumlah titik yang sama di kedua *mesh*, karena jika didapati ada titik yang hilang, maka akan dilakukan interpolasi. Kedua, secara matematis dapat dihitung untuk *mesh* yang berubah mendekati *mesh* target jika titik yang saling berhubungan terpilih (Poggio & Giroi, 1989) (Powell, 1987).

Secara bertahap contoh prosesnya dapat digambarkan sebagai berikut: pertama, secara biologis dipilih titik-titik penting secara manual, biasanya di area mata, hidung, bibir dan perimeter kedua model wajah. Kedua, titik-titik penting tersebut mendefinisikan koefisien kernel *radial basis function* yang akan digunakan untuk melakukan perubahan bentuk. Dan langkah terakhir, titik di *mesh* bentuk umum diinterpolasikan menggunakan koefisien yang dihitung dari titik-titik penting tersebut atau titik *landmark*. Keberhasilan perubahan bentuk tergantung pada seleksi titik-titik landmark (Pighin, Auslander, Lischinski, Salesin, & Szeliski, 1997).

Daripada melakukan perubahan bentuk model wajah, model yang mudah diubah disiapkan untuk pembuatan basis data wajah dengan pendekatan bentuk wajah manusia secara umum (Blanz & Vetter, 1999). Langkahnya meliputi: pertama, proses pemindaian dengan hasil data wajah yang kemudian disimpan di basis data. Contoh model wajah 3D ini digunakan untuk menjangkau ruang

kemungkinan dari wajah manusia dalam bidang geometri dan tekstur. Wajah baru dan ekspresi dapat di wakili sebagai sebuah kombinasi linier dari contoh-contoh yang ada, kemudian keluaran sistem akan menghasilkan model 3D dari seseorang yang mendekati ekspresi tangkapan citra.

2.10 Pemindahan Animasi Wajah

Pemindahan otomatis gerak wajah dari model sumber ke model target dapat secara signifikan menghemat waktu. Gerak wajah sumber dapat mempunyai beragam format, termasuk video wajah 2D, data motion capture wajah 3D, dan meshes wajah yang dianimasikan, sementara itu model target adalah *mesh* wajah 3D atau model wajah *blendshape*. Berdasarkan hal itu, animasi wajah dengan *performance-driven* dapat digunakan untuk memindahkan gerak wajah dari sumber video wajah 2D ke model wajah 3D.

Transfer gerak wajah antara dua meshes wajah 3D dapat dilakukan melalui deformasi geometri. Noh dan Neumman (Noh & Neumann, 2001) mencoba teknik kloning ekspresi untuk proses transfer perubahan posisi vertek dari satu buah sumber model wajah 3D ke target model wajah 3D yang dimungkinkan mempunyai perbedaan proporsional geometri dan struktur *mesh*. Ide dasarnya adalah untuk membangun pemetaan gerak vertek antar model melalui perubahan *radial basis function* (RBF). Sumner dan Popovic (Sumner & Popovic, 2004) mencoba kerangka kerja umum yang secara otomatis memindahkan perubahan geometri antara dua mesh segitiga. Hal ini dapat secara langsung mengaplikasikan target ulang gerak wajah dari satu sumber mesh wajah ke mesh wajah target. Kedua pendekatan itu membutuhkan beberapa titik inisialisasi wajah yang secara heuristik berhubungan (Noh & Neumann, 2001) atau dilakukan spesifikasi secara manual.

Beberapa pendekatan diusulkan untuk melakukan transfer gerak wajah sumber ke model wajah *blendshape* (Deng, Chiang, Fox, & Neumann, 2006). Choe dan Ko (Choe, Lee, & Ko, 2001) melakukan transfer gerak wajah yang dijejaki ke model wajah *blendshape* target dengan cara pengamatan perubahan otot dan analisis perubahan bobot melalui prosedur optimasi. Pyun dkk memindahkan animasi wajah menggunakan pendekatan berbasis contoh (Pyun, Kim, Chae, Kang, & Shin, 2003). Pendekatan ini membutuhkan keterlibatan seorang animator untuk

membentuk model wajah *blendshape* berdasarkan kunci pose wajah yang ada secara hati-hati. Hal ini yang mengakibatkan teknik ini sangat sulit dipakai jika hanya mempunyai model *blendshape* bentuk dasar dan tanpa melakukan pengolahan awal. Sifakis et al. (Sifakis, Neverov, & Fedkiw, 2005) pertama kali membuat model wajah yang akurat secara anatomi yang tersusun dari sistem otot wajah yang komplis, lapisan jaringan pasif, dan struktur tulang wajah. Kemudian digunakanlah metode non-linier elemen hingga untuk menggambarkan pergerakan otot yang akurat dari gerak penanda yang terdapat di wajah. Kekurangannya terletak pada keharusannya menggunakan model wajah 3D yang akurat secara anatomi. Deng et al (Deng, Chiang, Fox, & Neumann, 2006) mengusulkan teknik otomatis yang mampu secara langsung memetakan data *motion capture* wajah 3D ke model wajah *blendshape* yang sudah dibuat. Pada pendekatan tersebut RBF *network* dilatih untuk memetakan data *motion capture* baru ke bobot *blendshape* yang bersesuaian, berdasarkan pelatihan pasangan data antara kerangka *motion capture* dan bobot *blendshape*.

Pendekatan di atas menyalin gerak wajah antar model, tetapi mereka membutuhkan adanya fungsi transformasi, contohnya dalam proses penggantian mode efektif saat transfer. Model bilinier dan multilinier diajukan untuk melakukan transfer gerak wajah (Vlasic, Brand, Pfister, & Popovic, 2005). Chuang dan Bregler (Chuang & Bregler, 2005) mempelajari pemetaan ekspresi wajah atau fungsi transformasi dari pelatihan video menggunakan model bilinier (Tenenbaum & Freeman, 2000). Setelah itu hasil pemetaan belajar digunakan untuk mengubah video input dengan wajah netral menjadi video dengan wajah yang ekspresif. Vlasic et al. (Vlasic, Brand, Pfister, & Popovic, 2005) mengusulkan kerangka kerja untuk melakukan transfer gerak wajah di video ke wajah 2D atau 3D dengan pembelajaran statistik model multilinier dari data *mesh* wajah 3D hasil pemindaian. Pembelajaran model multilinier dikendalikan melalui parameter atribut seperti identitas dan ekspresi. Transfer gerak wajah dari satu model ke model lainnya dapat dilakukan jika merubah salah satu parameter atribut, seperti identitas, sementara dijaga agar atribut lain tetap. Kedua pendekatan tersebut menginterpretasikan ekspresi sebagai proses yang dinamis.

2.11 Pembangkitan Gerak Wajah

Sikap wajah diinterpretasikan sebagai sikap yang diikuti dengan otot wajah dan gerakan wajah dengan tanpa memperhitungkan komponen wajah lainnya, seperti: ekspresi wajah, gerakan kepala, dll. Khullar et al (Khullar & Badler, 1999) mengusulkan kerangka kerja untuk menghitung sikap termasuk gerakan bola mata dan gerakan kepala agen virtual di lingkungan yang dinamis. Vertegaal et al. (Vertegaal, Slagter, Derveer, & Nijholt, 2001) mempelajari tentang arah pergerakan bola mata yang dapat digunakan sebagai tanda untuk menunjukkan person yang sedang berbicara dan yang sedang mendengarkan dalam sebuah percakapan yang ramai atau melibatkan banyak orang. Lee et al. (Lee, Badler, & Badler, 2002) menganggap aspek tekstur dari pergerakan tatapan menggunakan pendekatan statistik dan mendemokan kebutuhan akan detail tatapan untuk mendapatkan aspek realistik dan menggambarkan kondisi mental si pelaku. Pada pendekatan tersebut, tanda dari penjejukan mata dianalisis untuk menghasilkan model statistik sebuah mata. Deng et al. (Deng, Lewis, & Neumann, 2005) mengusulkan teknik berbasis sintesis tekstur untuk secara simultan mensintesis tatapan mata yang realistik dan gerakan mengedip.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 3

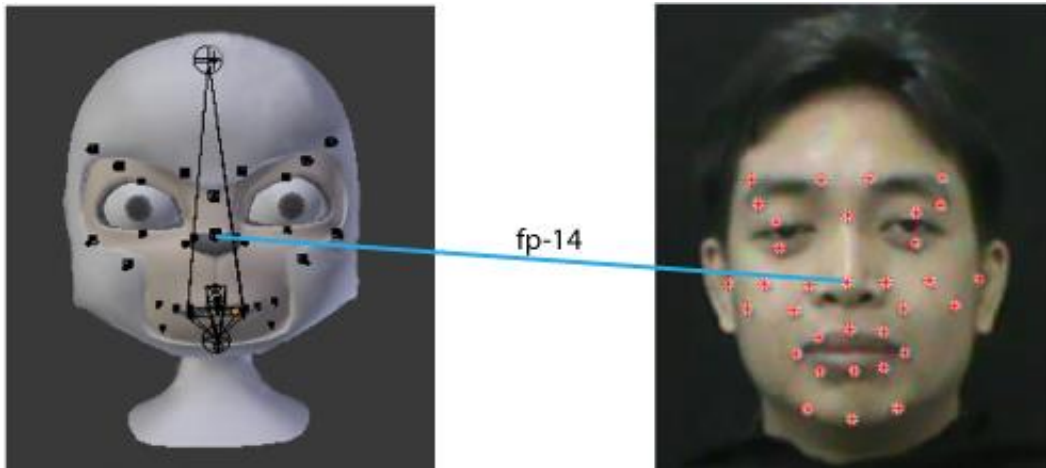
FEATURE POINT CLUSTER

3.1 *Feature-point*

Data pada *motion capture* terdiri dari data gerakan yang dijabarkan dalam beberapa *feature point*. Tujuan dari *feature point* adalah untuk menyederhanakan proses animasi wajah. Tantangan dari *feature point* ini adalah untuk menghasilkan animasi wajah senatural mungkin dengan menggunakan titik yang kurang dari titik yang digunakan untuk membentuk permukaan model wajah 3D (Zhu & Lee, 2007). Di sisi lain menggunakan *feature point* akan meringankan beban komputasi komputer dibandingkan menggunakan algoritma kalkulasi permukaan yang menghitung seluruh permukaan dari wajah.

Animasi wajah berkonsentrasi pada penciptaan ekspresi realistis pada model wajah 3D (Seol, Seo, Kim, Lewis, & Noh, 2011). Ada dua teknik yang dipakai dalam animasi wajah, teknik menggunakan penanda dan teknik tanpa penanda. Penggunaan penanda artinya pengelolaan animasi wajah akan dilakukan secara otomatis dengan menghitung pada *feature point*. Sedangkan untuk yang tidak menggunakan penanda animasi wajah dilakukan oleh animator dengan membandingkan permukaan model wajah 3D.

Permasalahan otomatisasi pergerakan ekspresi wajah pada proses animasi wajah 3D adalah pada saat pemetaan perubahan titik *rigging* model wajah 3D yang berasal dari titik *marker* yang dipasang pada subyek manusia selaku sumber gerak utamanya. Untuk memudahkan dalam pembahasan, titik *rigging* pada model wajah 3D yang berkorelasi dengan titik *marker* di citra sekuensial 2D disebut sebagai *feature-point*. Titik tersebut harus berjumlah sama dan saling berelasi untuk menghasilkan pemetaan ekspresi yang tepat.



Gambar 3.1 Korelasi *feature-point* ke-14 dengan titik *marker* pada wajah di posisi ke-14.

3.2 Perhitungan Jarak Antar Dua Titik

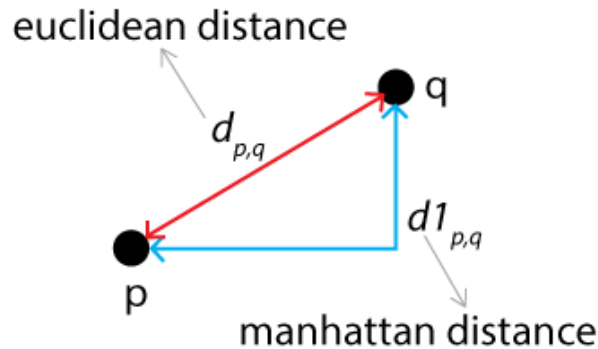
Perhitungan jarak antar dua buah titik di ruang koordinat 3D pada umumnya menggunakan prinsip perhitungan jarak *euclidean*. Jarak *euclidean* antara dua buah titik p dan q setara dengan panjangnya garis lurus yang ditarik menghubungkan kedua titik tersebut. Pada koordinat kartesian, jika $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ dan $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ adalah dua buah titik pada ruang n -dimensi *euclidean*, maka nilai jarak d dari p ke q atau dari q ke p dapat dihitung dengan Persamaan 3.1.

$$\begin{aligned}
 d_{p,q} = d_{q,p} &= \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2 + \dots + (q_n - p_n)^2} \\
 &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2}
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

Berbeda halnya jika perhitungan jarak antar dua buah titik menggunakan rumus *manhattan distance*. *Manhattan distance* memperhitungkan jarak antar dua buah titik berbasis pada struktur *grid* secara vertikal dan/atau horisontal yang sesuai dengan bentuk *grid*-nya. Sehingga untuk menghitung *manhattan distance* antar dua buah titik $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ dan $q = (q_1, q_2, \dots, q_n)$ di ruang n -dimensi dapat dihitung dari jumlahan panjang proyeksi segmen garis antara titik-titik ke sumbu koordinatnya, secara matematis dapat dihitung dengan Persamaan 3.2.

$$d1_{p,q} = \|p - q\|_1 = \sum_{i=1}^n |p_i - q_i|
 \tag{3.2}$$

Sebagai ilustrasi perbedaan cara perhitungan jarak antara *euclidean distance* $d_{p,q}$ dengan *manhattan distance* $d1_{p,q}$ untuk dua buah titik p dan q dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Perbedaan cara perhitungan jarak antara *euclidean distance* $d_{p,q}$ dengan *manhattan distance* $d1_{p,q}$ untuk dua buah titik p dan q .

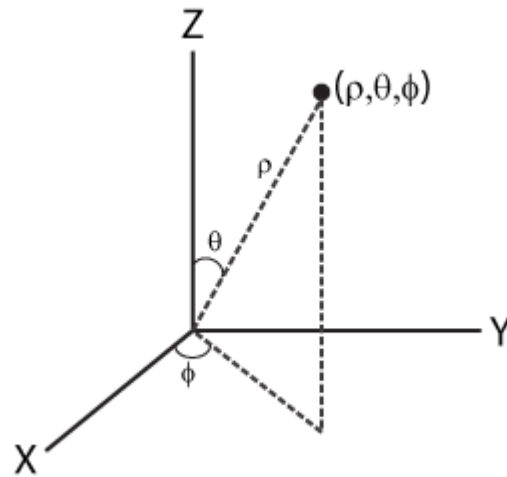
Perhitungan jarak dapat juga mempertimbangkan bentuk bidang permukaan dari posisi titik yang akan dihitung jaraknya. Untuk kasus model wajah 3D pendekatan dapat dilakukan pada bidang ruang 3D berbentuk bola. Perhitungan jarak dalam sistem koordinat bola bukanlah garis lurus seperti pada perhitungan dua titik menggunakan *euclidean*, melainkan garis kurva lurus yang mengikuti bentuk permukaan bola. Formula penghitungan jarak ini dinamakan formula penghitungan jarak *geodesic*. Jarak *geodesic* pada permukaan bola dihitung menggunakan *haversine distance*. Metode ini cocok digunakan untuk penghitungan jarak terpendek berdasarkan koordinat bola. Jikalau ada sebuah titik dalam koordinat kartesian memiliki komponen sumbu x , y dan z supaya dapat dihitung jarak terpendeknya dengan pendekatan koordinat bola, maka perlu dilakukan konversi koordinat kartesian menjadi koordinat bola terlebih dahulu. Korelasi kedua sistem koordinat dapat dijabarkan dalam Persamaan 3.3 sampai 3.5.

$$x = \rho \sin \varnothing \cos \theta \quad (3.3)$$

$$y = \rho \sin \varnothing \sin \theta \quad (3.4)$$

$$z = \rho \cos \varnothing \quad (3.5)$$

Dengan ρ (ro) adalah radius, θ (theta) adalah garis lintang, dan \varnothing (phi) adalah garis bujur. Representasi posisi ρ , θ , dan \varnothing dalam koordinat bola dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Koordinat bola (ρ, θ, ϕ)

Dari korelasi antara sistem koordinat bola dengan kartesian dapat dijabarkan formula pembalik untuk mendapatkan koordinat bola (ρ, θ, ϕ) dari posisi titik tertentu di sistem koordinat kartesian (x, y, z) . Nilai ρ yang merupakan nilai radius atau jarak dari pusat bola ke posisi titik tertentu dapat dihitung dengan *euclidean distance* (3.6). Sedangkan nilai θ didapatkan dari hasil perhitungan *arc cos* nilai komponen z dibagi nilai ρ (3.7). Dan nilai ϕ didapatkan dari nilai *arc cos* dari nilai komponen sumbu x dibagi $\rho \sin \theta$ (3.8).

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (3.6)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{z}{\rho}\right) \quad (3.7)$$

$$\phi = \arccos\left(\frac{x}{\rho \sin \theta}\right) \quad (3.8)$$

Setelah ketiga komponen (ρ, θ, ϕ) dihitung, maka dilanjutkan dengan kalkulasi perhitungan jarak dengan *haversine distance* dengan Persamaan 3.11 dengan terlebih dahulu mencari nilai variabel c (3.10) dan a (3.9).

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) + \cos \theta_1 \times \cos \theta_2 \times \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right) \quad (3.9)$$

$$c = 2 \operatorname{atan2}\left(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}\right) \quad (3.10)$$

$$d = \rho c \quad (3.11)$$

3.3 Cluster dan Clustering

Cluster adalah sekumpulan obyek yang memiliki kemiripan. Sedangkan *clustering* adalah proses untuk mengelompokkan data ke dalam beberapa *cluster* sehingga data dalam satu *cluster* memiliki tingkat kemiripan yang tinggi dan data antar *cluster* memiliki tingkat kemiripan yang rendah. *Clustering* sering digunakan untuk proses segmentasi data atau obyek, sehingga dalam proses sintesis ekspresi wajah ke model 3D dapat digunakan untuk membentuk segmen area terpengaruh-gerak secara otomatis pada model wajah 3D yang berkaitan dengan titik *rigging* selaku *feature-point* dalam proses *clustering*.

Clustering yang menggunakan *feature-point* sebagai titik pusat pengelompokannya ini dinamakan sebagai *feature-points clustering*. Sehingga *cluster* yang terbentuk disebut sebagai *feature-point cluster*. Perbedaannya dengan proses *clustering* metode *k-means* tampak pada proses pemilihan titik pusat, dimana pada metode *k-means* titik pusat awal dipilih secara acak dan secara iterasi diperbaharui dengan nilai rerata dari masing-masing *cluster* yang terbentuk sampai tidak terjadi perubahan titik pusat. Sedangkan pada *feature-points clustering*, titik pusat adalah titik *rigging* yang disebut sebagai *feature-point* sehingga tidak memerlukan proses iterasi khusus dalam menentukannya dan proses *clustering* berlanjut pada proses seleksi pemilihan anggota *cluster*.

3.4 K-means Clustering

K-means clustering adalah metode *clustering* yang sering dipakai untuk melakukan pengelompokan data atau segmentasi data yang tidak berlabel. Tujuan akhir dari metode *k-means* adalah untuk mencari kelompok data sebanyak nilai variabel *k* yang ditentukan. Algoritma *k-means* bekerja secara berulang untuk menetapkan setiap data ke dalam salah satu dari *k* kelompok atau *cluster* berdasarkan nilai fitur yang dipunyai. Setiap data terkelompokkan berdasarkan kemiripan fitur yang dipunyainya.

Tahapan algoritma *k-means clustering* dapat dilakukan dengan cara:

a. Tahap *data assignment*

Pada tahapan ini sejumlah data sebanyak nilai variabel *k* ditentukan secara acak dan ditetapkan sebagai data *centroid* awal.

Setiap *centroid* mendefinisikan sebuah *cluster*. Tahap ini setiap data selain *centroid* di tetapkan menjadi anggota *cluster* dengan *centroid* yang terdekat menggunakan perhitungan jarak *euclidean*. Secara matematis dapat dinyatakan bahwa jika c_i adalah *centroid* yang terhimpun dalam C , maka setiap data selain *centroid* yang dinyatakan sebagai xs dapat ditetapkan sebagai anggota *cluster* berdasarkan Persamaan 3.12.

$$\arg \min_{c_i \in C} \text{dist}(c_i, xs)^2 \quad (3.12)$$

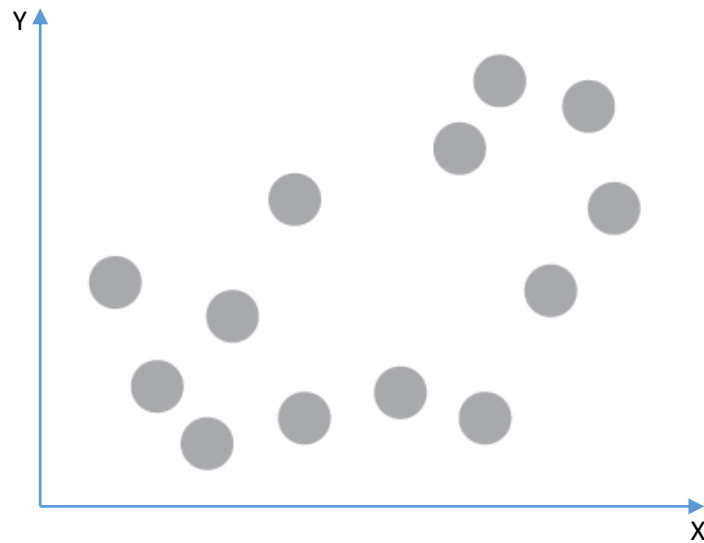
Dengan $\text{dist}()$ melambangkan perhitungan jarak *euclidean*. Himpunan data yang telah menjadi anggota *cluster* dengan *centroid* c_i kemudian dinyatakan sebagai S_i .

b. Tahap *centroid update*

Pada tahap ini penghitungan ulang *centroid* dilakukan. Perhitungan *centroid* c_i yang baru dilakukan dengan mencari nilai rata-rata di setiap *cluster* S_i dengan menggunakan Persamaan 3.13.

$$c_i = \frac{1}{|S_i|} \sum_{xs_i \in S_i} xs_i \quad (3.13)$$

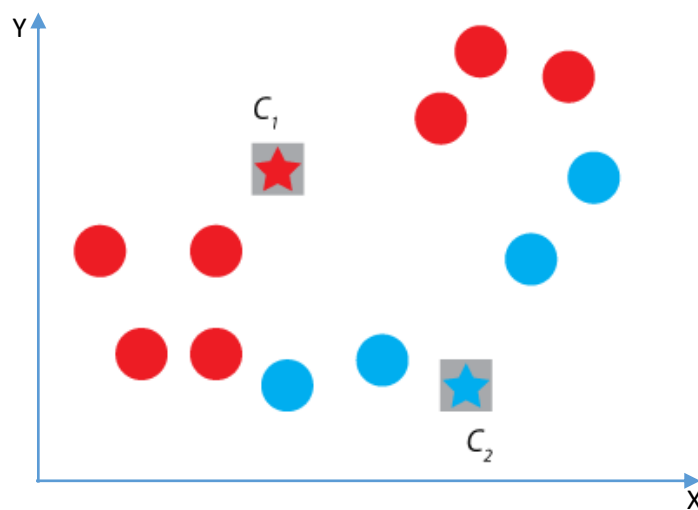
Algoritma *k-means* beriterasi dari tahapan a dan b sampai memenuhi kriteria untuk berhenti. Kriteria iterasi dinyatakan berhenti bisa berupa kondisi tidak berubahnya anggota *cluster* atau jika sudah mencapai jumlah iterasi tertentu yang telah ditentukan di awal. Ilustrasi dari cara kerja dan terjadinya perpindahan *centroid* dari setiap iterasi yang dilakukan dapat dijelaskan oleh sekelompok data tersebar x dalam bidang kartesian xy yang akan dikelompokkan dalam 2 buah *cluster*, S_1 dan S_2 seperti tampak pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Sekelompok data tersebar x dalam bidang kartesian xy .

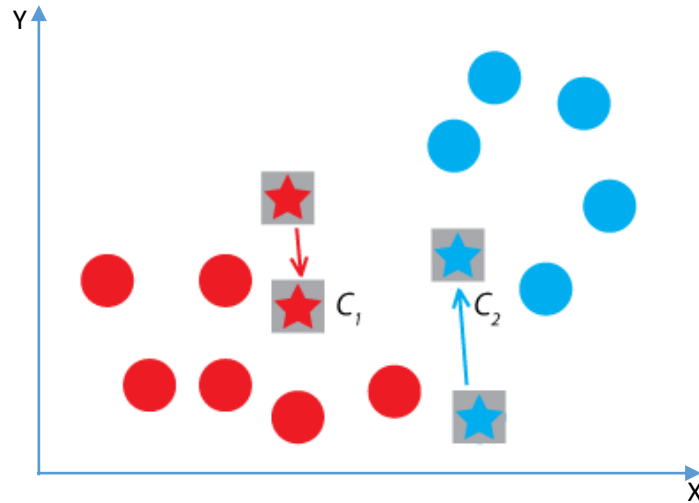
Langkah 1. Penentuan 2 buah *centroid* awal, yaitu c_1 dan c_2 yang dipilih secara acak.

Langkah 2. Lakukan perhitungan jarak setiap data yang ada ke *centroid* c_1 dan c_2 . Jika data xs memiliki jarak terdekat terhadap *centroid* c_1 , maka data xs diberikan label '1'. Jika data xs memiliki jarak terdekat terhadap *centroid* c_2 , maka data xs diberikan label '2'. Pada Gambar 3.5, data xs dengan label '1' diberi warna merah dan data xs dengan label '2' diberi warna biru.



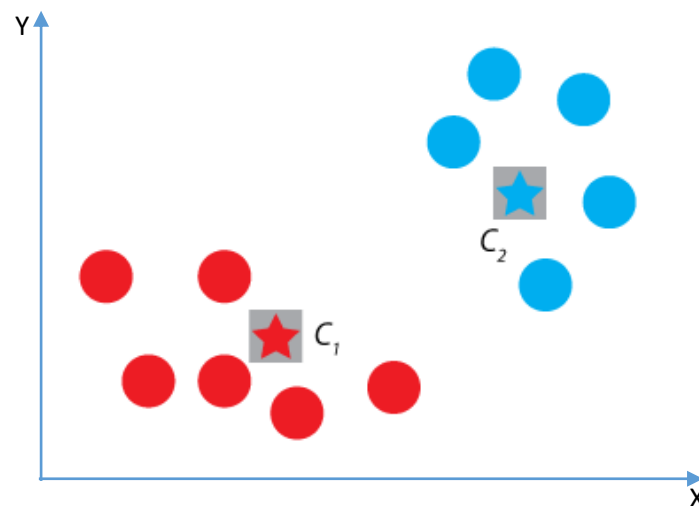
Gambar 3.5 Hasil pengelompokan data dengan 2 buah *centroid* awal, yaitu c_1 dan c_2 yang dipilih secara acak.

Langkah 3. Selanjutnya untuk setiap *cluster* yang terbentuk S_1 dan S_2 dilakukan perhitungan nilai rata-rata yang akan dijadikan sebagai nilai *centroid* c_1 dan c_2 yang baru. Setelah nilai c_1 dan c_2 dipindah ke posisi yang baru, maka dilakukan tahapan seperti pada Langkah 2 dan perhitungan keanggotaan *cluster* yang terbaru, Gambar 3.5.



Gambar 3.6 Hasil pengelompokan data terbaru dengan 2 buah *centroid* c_1 dan c_2 yang merupakan hasil rata-rata dari *cluster* S_1 dan S_2 .

Lakukan Langkah 2 dan Langkah 3 secara berulang sampai kedua *centroid* c_1 dan c_2 tidak berubah atau telah memenuhi kriteria kondisi berhenti yang telah ditentukan di awal. Kondisi akhir dari pengelompokannya dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Hasil akhir pengelompokan data dan terbentuklah *cluster* S_1 dan S_2 .

3.5 Feature-points clustering

Istilah *feature-points clustering* dikenalkan untuk menamakan proses *clustering* yang menggunakan nilai *feature-point* yang telah ditentukan sebagai pusat pengelompokannya. Proses *clustering* yang dilakukan sudah tidak perlu melakukan perhitungan iterasi untuk mendapatkan pusat kelompok atau *cluster* yang akan dibentuk karena nilai *feature-point* yang dipilih dianggap sebagai pusat atau dalam pembahasan mengenai *k-means clustering* dikenal sebagai *centroid*.

Sehingga untuk $X \in R^3, X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ adalah himpunan titik dan $F \in X, F = \{f_1, f_2, \dots, f_m\}$ adalah sembarang titik *rigging* yang dipilih sebagai *feature-point* dari X dengan $m < n$, maka *Feature Point Cluster (P)* didefinisikan sebagai kelompok himpunan titik pada X yang memiliki jarak minimum atau terdekat pada f_m dimana $P \in X$ dengan $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$.

Titik pusat *cluster* ditentukan dari nilai F , proses pembentukan kelompok yang didasarkan pada nilai dan posisi *feature-point* dilakukan dengan terlebih dahulu memisahkan anggota himpunan X yang bukan merupakan *feature-point* selaku titik pusat dan menampungnya dalam himpunan X_s (3.14).

$$X_s = \{x \in X \mid \neg(x \cap F)\} \quad (3.14)$$

Proses keanggotaan kelompok ditentukan dengan terlebih dahulu menghitung jarak masing-masing anggota X_s ke masing-masing *feature-point* f_m menggunakan jarak Euclidean (3.15),

$$d_{i,m} = \sqrt{\sum (x_{s_i} - f_m)^2} \quad (3.15)$$

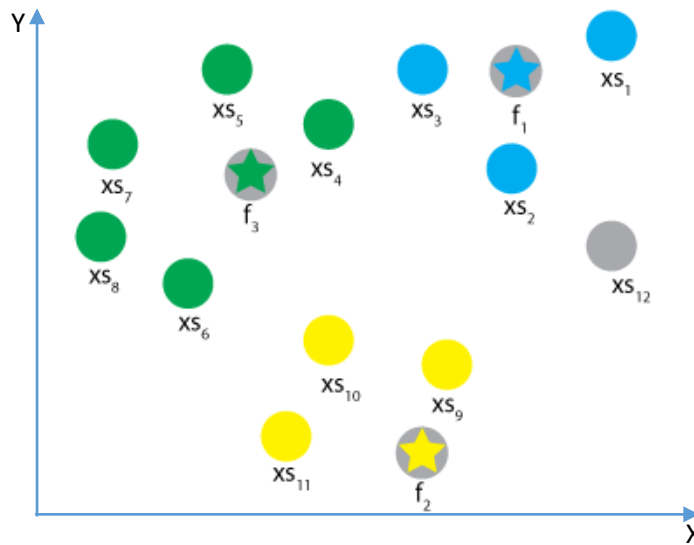
sehingga setiap titik x_{s_i} akan memiliki nilai jarak terhadap seluruh *feature-point* f_m dimana $m \in \mathbb{R}$ (3.16),

$$D_i = [d_{i,1}, d_{i,2}, d_{i,3}, \dots, d_{i,m}]. \quad (3.16)$$

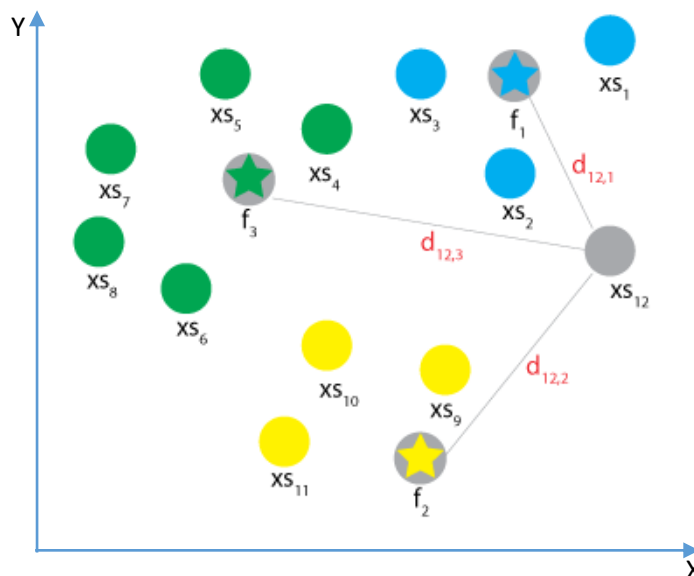
Keanggotaan kelompok dengan pusat *feature-point* f_m ditentukan dengan nilai jarak minimum atau terdekat ($\min(D_i)$) ke pusat tersebut, sehingga dapat dipastikan semua anggota himpunan data titik tersebar X memiliki nilai keanggotaan dengan pusat *cluster* pada titik *feature-point* f_m .

Sebagai contoh pada Gambar 3.8 digambarkan sebuah titik $x_{s_{12}}$ yang akan ditentukan keanggotaannya terhadap tiga buah *cluster* yang memiliki titik pusat berupa *feature-point* f_1, f_2 , dan f_3 . Untuk dapat diketahui titik $x_{s_{12}}$ memiliki jarak

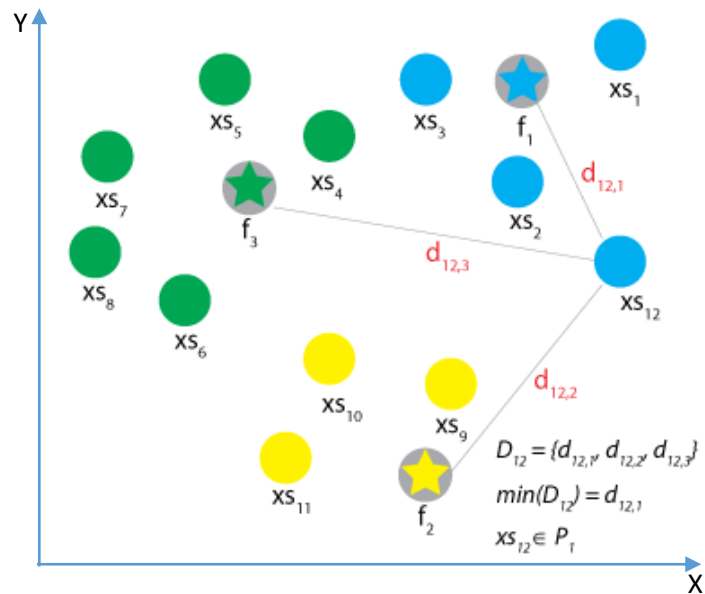
terdekat dengan pusat f_1 , f_2 , atau f_3 , maka dihitunglah nilai jarak terhadap ketiga buah pusat tersebut dan disimpan sebagai nilai $d_{12,1}$, $d_{12,2}$, dan $d_{12,3}$ (Gambar 3.9). Ketiga nilai jarak yang diperoleh terhadap tiga buah pusat *cluster* kemudian dinyatakan sebagai nilai $D_{12} = \{d_{12,1}, d_{12,2}, d_{12,3}\}$ dan dapat dihitung nilai jarak terdekatnya yaitu $\min(D_{12}) = d_{12,1}$. Sehingga keanggotaan titik xs_{12} terletak pada *cluster* P_1 (Gambar 3.10).



Gambar 3.8 Sebuah titik xs_{12} yang akan ditentukan keanggotaannya terhadap tiga buah *cluster* yang memiliki titik pusat berupa *feature-point* f_1 , f_2 , dan f_3 .



Gambar 3.9 Nilai jarak titik xs_{12} terhadap ketiga buah pusat *cluster* f_1 , f_2 , dan f_3 sebagai nilai $d_{12,1}$, $d_{12,2}$, dan $d_{12,3}$



Gambar 3.10 Keanggotaan titik xs_{12} pada $cluster P_1$ yang berpusat pada f_1 dikarenakan nilai jarak terdekatnya yaitu $\min(D_{12}) = d_{12,1}$

3.6 Otomatisasi Segmentasi Area Gerak pada Model Wajah 3D Menggunakan *Feature-points clustering*

Ada beberapa tahapan panjang dalam proses pembuatan gerakan pada animasi, yang membuat prosesnya sendiri memakan waktu lama untuk menyelesaikannya. Salah satu bagian kecil dari proses awal pembuatan gerak adalah menentukan area gerak yang akan terpengaruh bila terjadi perubahan posisi *rigging* akibat terjadinya sebuah gerakan. Daerah ini merupakan area bobot untuk pergerakan, terbentuk dan dipengaruhi secara lokal pada setiap titik gerak. Sedangkan untuk gerakan di area wajah, area bobot ini tampil sebagai sejumlah kelompok yang mengelilingi *feature-point* gerak wajah yang berupa titik *rigging*.

Otomatisasi dalam menentukan area gerak diupayakan bisa meminimalkan campur tangan manusia untuk mempercepat proses produksi. Kemampuan algoritma untuk menghasilkan area gerak berdasarkan bentuk model wajah 3D, wajah manusia atau wajah karakter kartun merupakan tantangan dalam melakukan otomatisasi segmentasi. Pendekatan *cluster* dipilih karena mampu melakukan pengelompokan anggota secara otomatis dan peka terhadap posisi *vertex*, sehingga dapat memastikan setiap *vertex* untuk memiliki pusat gerak yang akan dijadikan

acuan deformasi lokal. Hal itu dianggap penting karena tahapan ini di industri masih dilakukan secara manual. Proses ini sangat memakan waktu dan menghabiskan terlalu banyak sumber daya manusia karena setiap karakter pergerakannya didasarkan pada ekspresi dan keunikannya masing-masing.

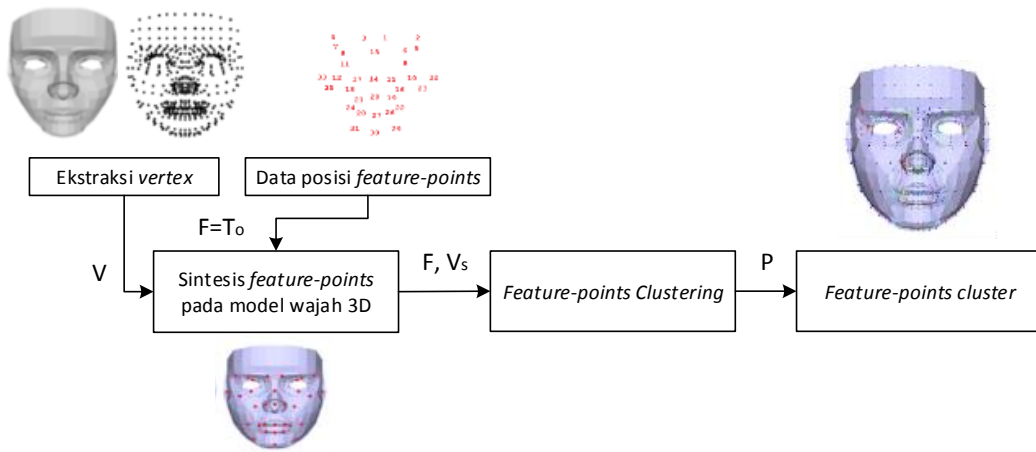
Penelitian ini menggunakan model wajah 3 dimensi yang diberi penanda atau *marker* sebagai acuan utama sesuai dengan posisi titik *rigging*. Secara hipotesis pendekatan *feature-points clustering* dapat menyederhanakan pemrosesan untuk mendapatkan daerah yang terkena dampak pengaruh perubahan posisi titik *rigging* selaku *feature-points*. Tujuan penelitian adalah untuk mendapatkan model wajah 3D tersegmentasi secara otomatis berdasarkan lokasi *rigging* yang telah ditentukan. Hasil ini dapat digunakan sebagai kontribusi teknik baru untuk segmentasi otomatis pada model wajah 3D berbasis pada letak titik *rigging*.

Pada Gambar 3.11 dijabarkan dalam bentuk alur seluruh proses *feature-points clustering* mulai dari tahapan awal proses *feature-points clustering* yang dilakukan, yaitu mengekstrak data *vertex* dari model wajah 3D dan disimpan dalam matrik V sampai terbentuknya *feature-points cluster*. Matrik T_o yang telah ditentukan posisinya berikut korelasinya dengan nomor parameter matrik sumber di *frame* ke-1 digunakan sebagai data acuan pembentukan *feature-point cluster* dan dipakai sebagai nilai matrik F , yang merupakan himpunan nilai *feature-point* selaku pusat dari *cluster*. $F = T_o$ sehingga jika dijabarkan matrik F akan beranggotakan m buah *centroid* yang merupakan nilai *feature-points* pada data target.

$$F = \{f_1, f_2, f_3, \dots, f_m \mid f \in \mathbb{R}^3\} \quad (3.17)$$

Sebelum dilakukan proses keanggotaan *cluster*, maka perlu dilakukan proses ekstraksi elemen matrik *vertex*(V) yang bukan merupakan titik *centroid* sehingga didapatkan elemen matrik potensial anggota *cluster*(V_s).

$$V_s = \{v \in V \mid \neg(V \cap C)\} \quad (3.18)$$



Gambar 3.11 Alur pembentukan *feature-points cluster* pada model wajah 3D

Setelah V_s terbentuk, maka dilakukanlah proses keanggotaan dengan menghitung jarak masing-masing anggota V_s ke masing-masing *feature-point* f_m menggunakan jarak Euclidean (3.19),

$$d_{i,m} = \sqrt{\sum (vs_i - f_m)^2} \quad (3.19)$$

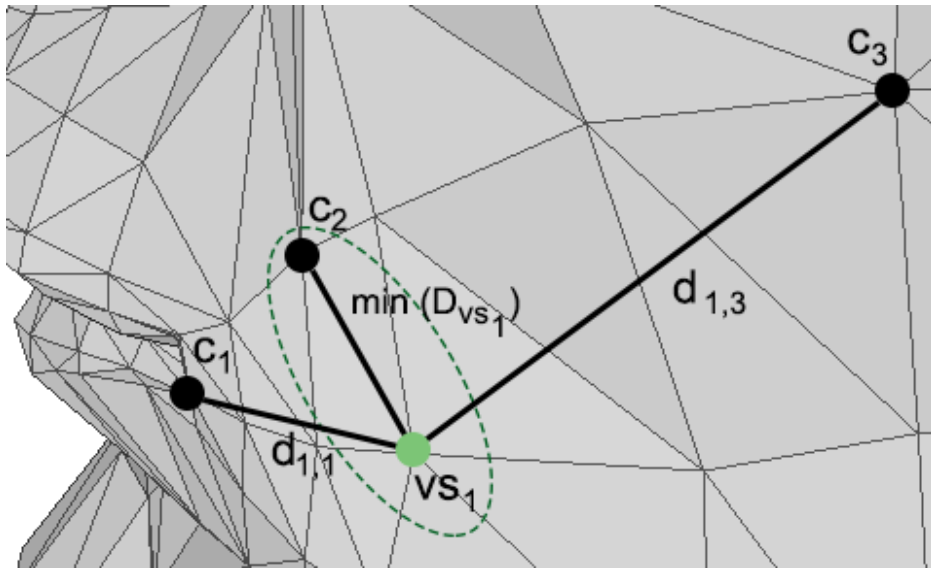
sehingga setiap vertex vs_i akan memiliki nilai jarak terhadap *feature-point* f_m (3.20),

$$D_i = [d_{i,1}, d_{i,2}, d_{i,3}, \dots, d_{i,m}]. \quad (3.20)$$

Keanggotaan vertek ditentukan dengan mempertimbangkan kesamaan dari *vertex* ke *centroid* dengan mengaitkannya dengan jarak minimum (D_i) ke *centroid* berupa *feature-point* f_m .

Pada Gambar 3.12 diilustrasikan proses keanggotaan untuk *vertex* vs_1 terhadap 3 buah *centroid* (c_1 , c_2 , dan c_3). vs_1 memiliki nilai jarak terhadap masing-masing *centroid* dengan nilai $d_{1,1}$, $d_{1,2}$ dan $d_{1,3}$. Namun vs_1 memiliki nilai jarak terminimum terhadap *centroid* c_2 , sehingga vs_1 menjadi anggota *cluster* dari *centroid* c_2 . Setelah proses *feature-point clustering* selesai, maka didapatkan data keanggotaan *feature-point cluster* (P) untuk masing-masing *feature-point* f sebanyak jumlah *feature-point* m .

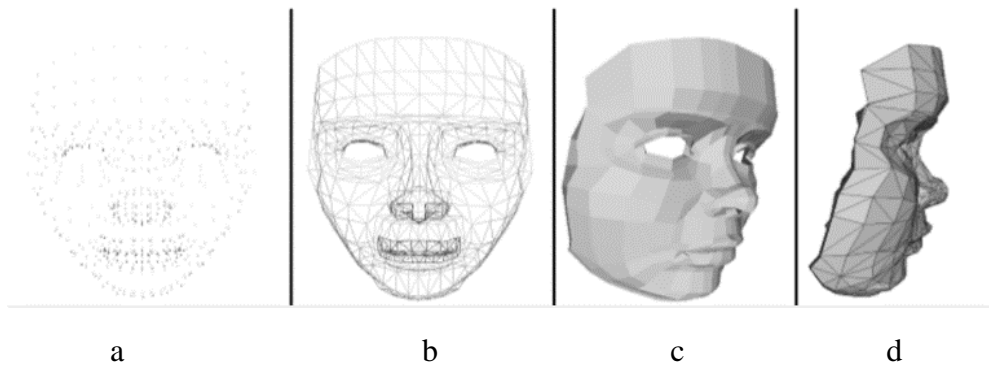
$$P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\} \quad (3.21)$$



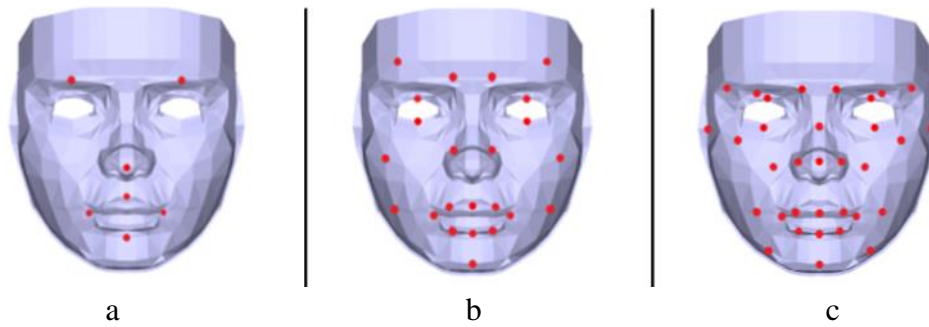
Gambar 3.12 Proses penentuan anggota *cluster* untuk *vertex vs₁*

3.7 Eksperimentasi *Feature-points Clustering* pada Model 3D Wajah Manusia

Percobaan dilakukan pada model data 3D wajah manusia yang setiap elemen *vertex* dan *edge* dapat diekstrak dalam bentuk matrik, Gambar 3.13. Model ini diproses dengan menggunakan variasi 7, 23 dan 33 titik *rigging* selaku *feature-points* seperti pada Gambar 3.14. Observasi eksperimental dilakukan dengan pendekatan sintesis pengelompokan secara langsung melintasi *vertex* permukaan dalam perhitungan jarak garis lurus menggunakan *euclidean distance* pada model 3D wajah manusia dengan *centroid* pada titik *rigging* untuk setiap variasi. Hasil *cluster* yang terbentuk tersebut nantinya akan menjadi area pembobotan untuk setiap titik *rigging* yang dipergunakan saat terjadinya deformasi wajah.

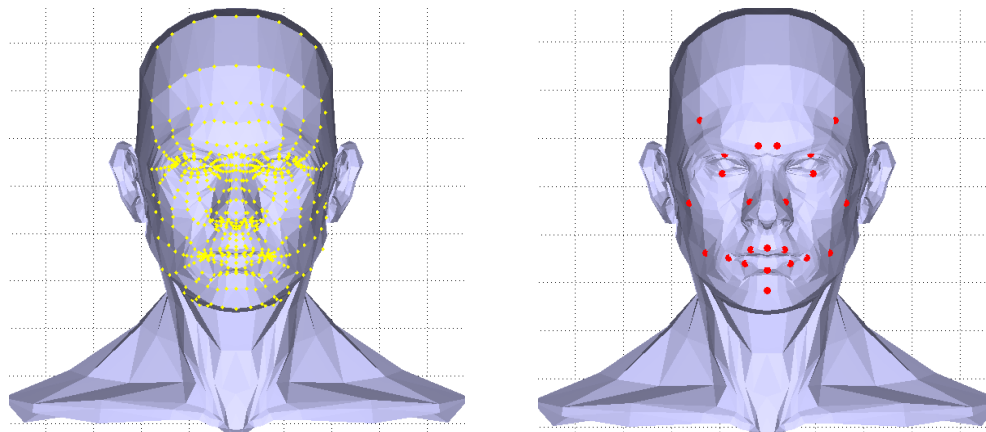


Gambar 3.13. a) *vertex* wajah 3D; b) garis poligonal 3D membentuk wajah; c) model wajah 3D *low-poly*; d) wajah 3D poligonal



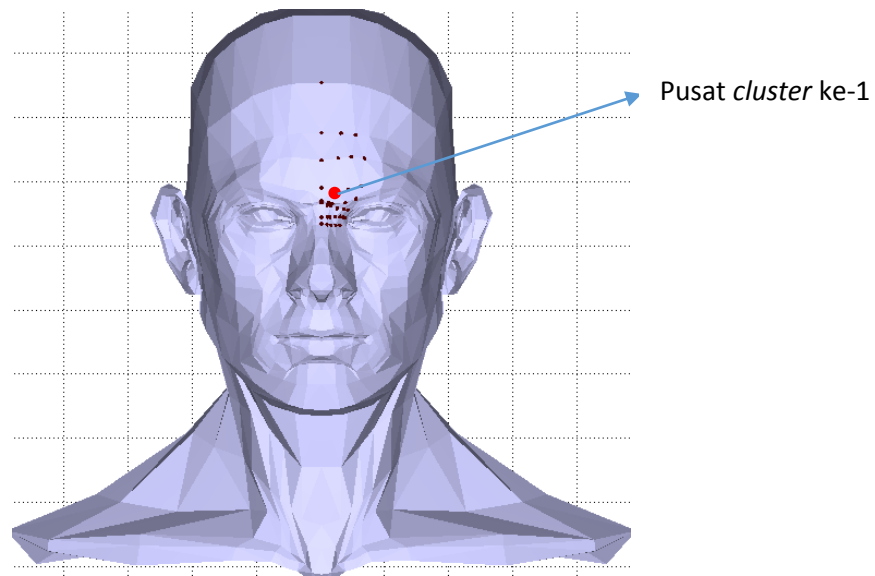
Gambar 3.14 Variasi sintesis lokasi *feature-points* pada model 3D wajah manusia dengan a) 7 *feature-points*; B) 23 *feature-points*; C) 33 *feature-points*

Pembentukan *cluster* dilakukan dengan mencari jarak terdekat dari masing-masing titik *vertex* ke posisi *feature-points* yang telah ditanamkan di wajah. Jika vertek v_i memiliki jarak minimum untuk *feature-point* f_m , maka vertek v_i akan menjadi anggota klaster *feature-point* f_m . Gambar 3.15 bagian kiri adalah contoh registrasi *vertex* yang akan diproses *feature-points clustering* dengan posisi *feature-points* sejumlah 23 titik(bagian kanan).

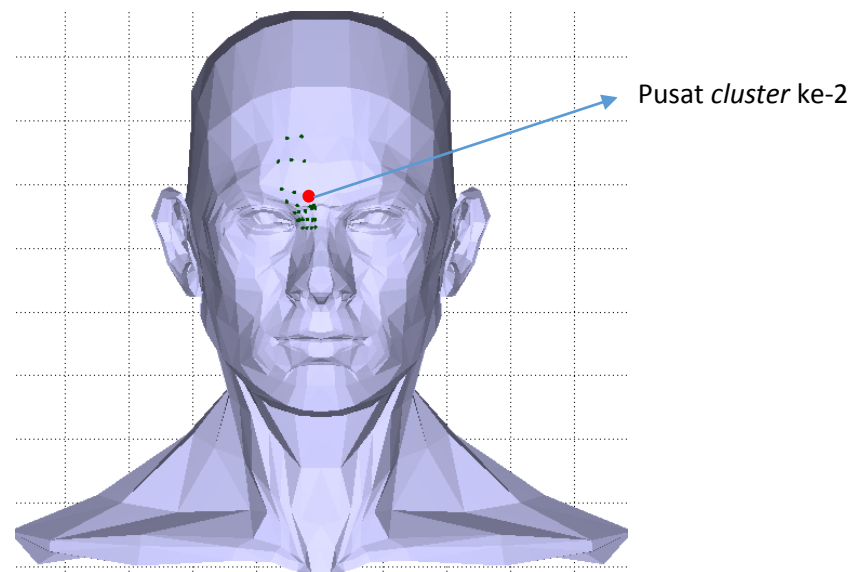


Gambar 3.15. Registrasi dan ekstraksi *vertex* yang akan diproses *feature-points clustering*(kiri) dengan jumlah dan posisi *feature-points* sebanyak 23 titik(kanan)

Setelah proses *feature-points clustering*, sebagai contoh hasil area *cluster* yang terbentuk di setiap *cluster*-nya dapat ditunjukkan pada Gambar 3.16 sampai Gambar 3.38 yang masing-masing berurutan menggambarkan titik-titik terpilih sebagai anggota *cluster* ke-1(Gambar 3.16) sampai *cluster* ke-23(Gambar 3.38).

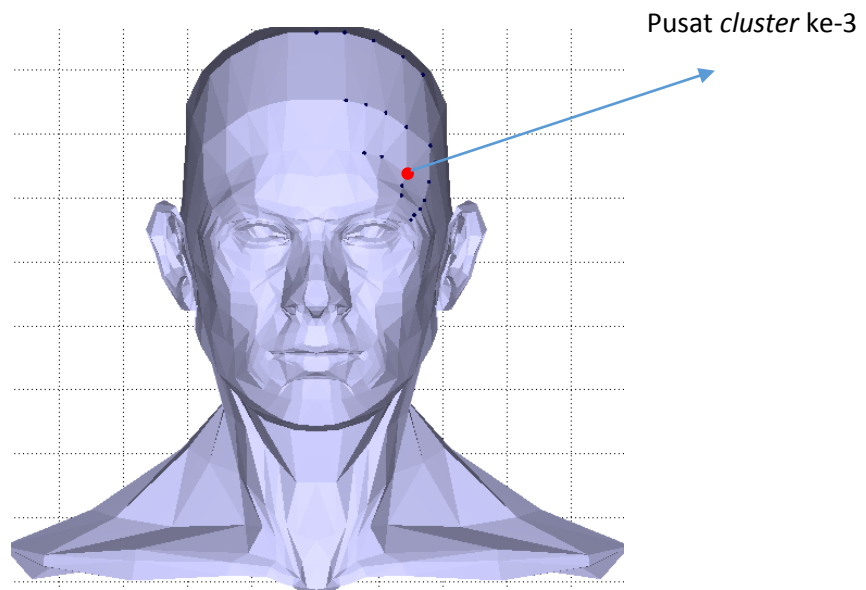


Gambar 3.16 Area *cluster* ke-1 di kening kanan



Gambar 3.17 Area *cluster* ke-2 di kening kiri

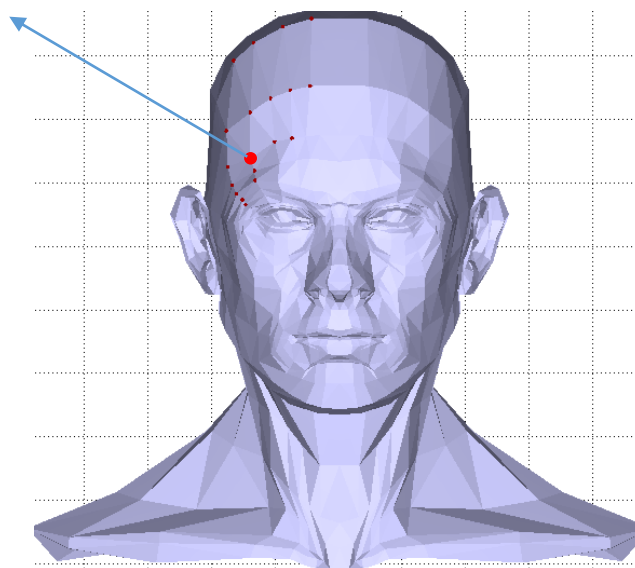
Pada Gambar 3.16, area *cluster* ke-1 terbentuk di kening kanan sampai bagian sisi atas dengan pusat *cluster* ke-1 pada kening kanan. Sedangkan pada Gambar 3.17, area *cluster* ke-2 terbentuk di area kening kiri sampai pada area sisi bagian atasnya dengan pusat *cluster* ke-2 pada kening kiri. Pada *cluster* ke-3, Gambar 3.18, pusat *cluster* terdapat pada pelipis kanan dengan area yang terbentuk melingkupi sisi pelipis kanan sampai bagian atas muka wajah bagian kanan.



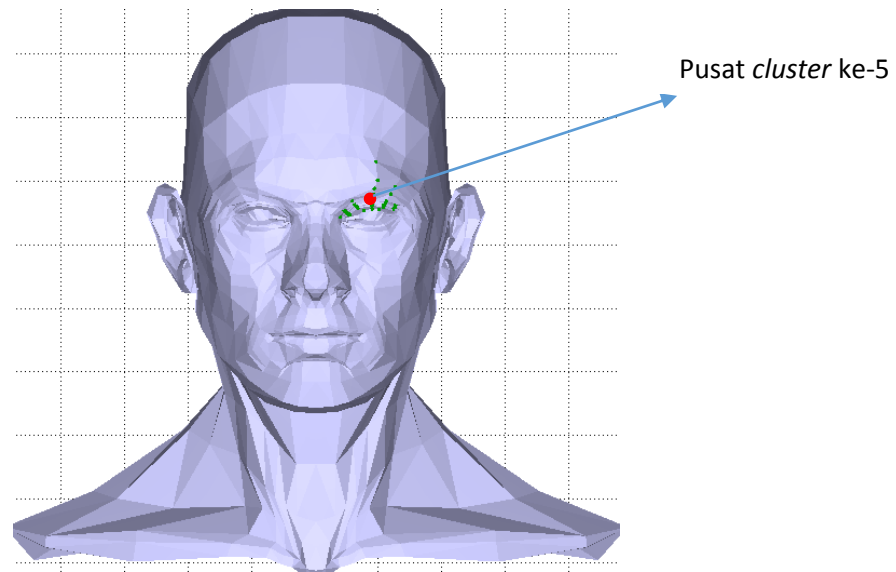
Gambar 3.18 Area *cluster* ke-3 di pelipis kanan

Cluster ke-4, Gambar 3.19, mencakup area sisi pelipis kiri sampai bagian atas muka wajah bagian kiri dengan pusat *cluster*-nya terletak di pelipis kiri. Area pergerakan kelopak mata bagian kanan dipengaruhi oleh pusat *cluster* ke-5, Gambar 3.20, dengan cakupan area di sisi bagian atas mata kanan termasuk pada area alis luar bagian kanan.

Pusat *cluster* ke-4

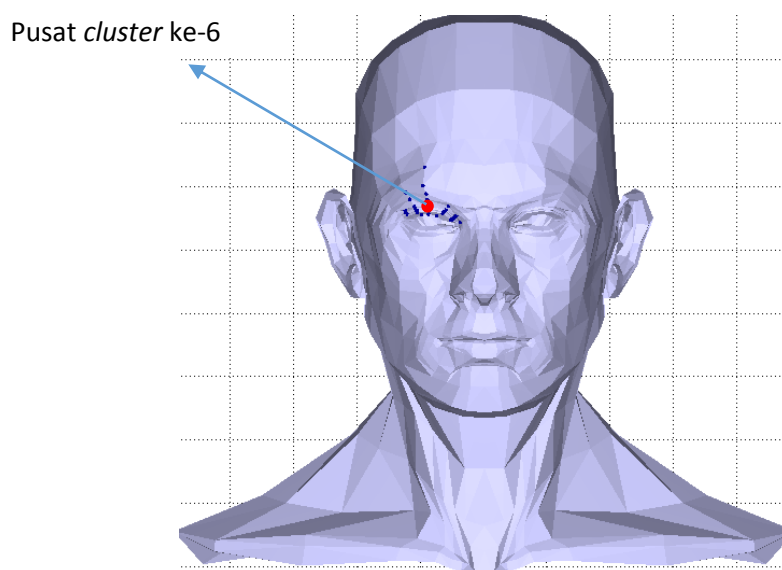


Gambar 3.19 Area *cluster* ke-4 di pelipis kiri

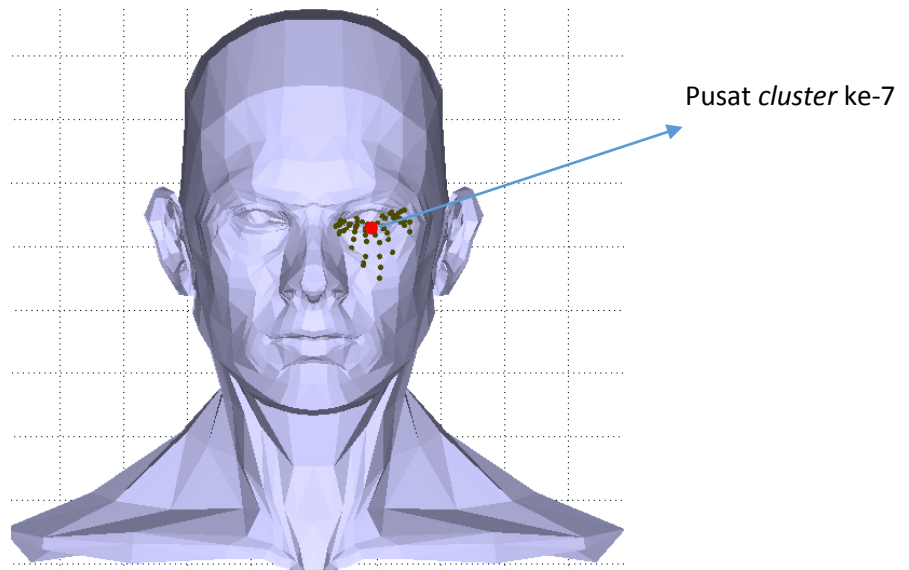


Gambar 3.20 Area *cluster* ke-5 di kelopak mata kanan

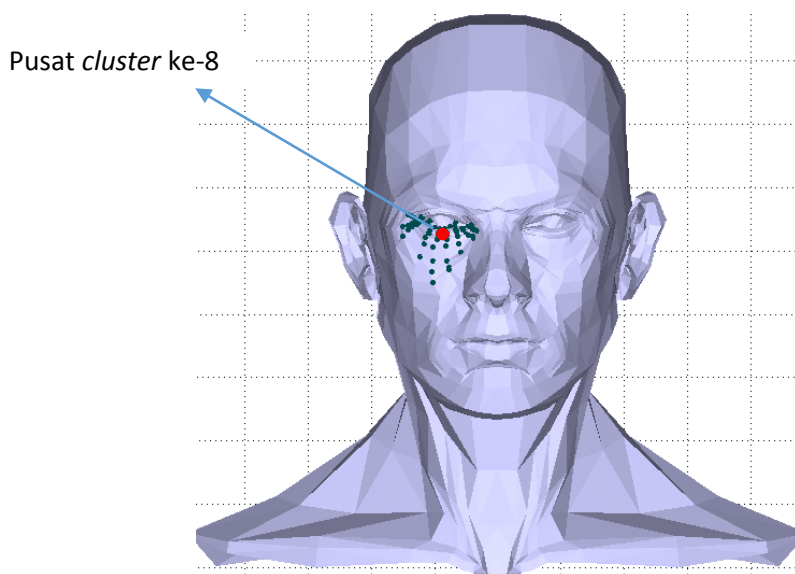
Begitu juga area pergerakan kelopak mata bagian kiri yang dipengaruhi oleh pusat *cluster* ke-6, Gambar 3.21, dengan cakupan area di sisi bagian atas mata kiri termasuk pada area alis luar bagian kiri. Area *cluster* bawah mata bagian kanan dibentuk dari keberadaan pusat *cluster* ke-7 dan dinamai area *cluster* ke-7 (Gambar 3.22), sedangkan sisi area bawah mata bagian kiri terbentuk karena keberadaan pusat *cluster* ke-8 dan dinamakan area *cluster* ke-8 (Gambar 3.23).



Gambar 3.21 Area *cluster* ke-6 di kelopak mata kiri

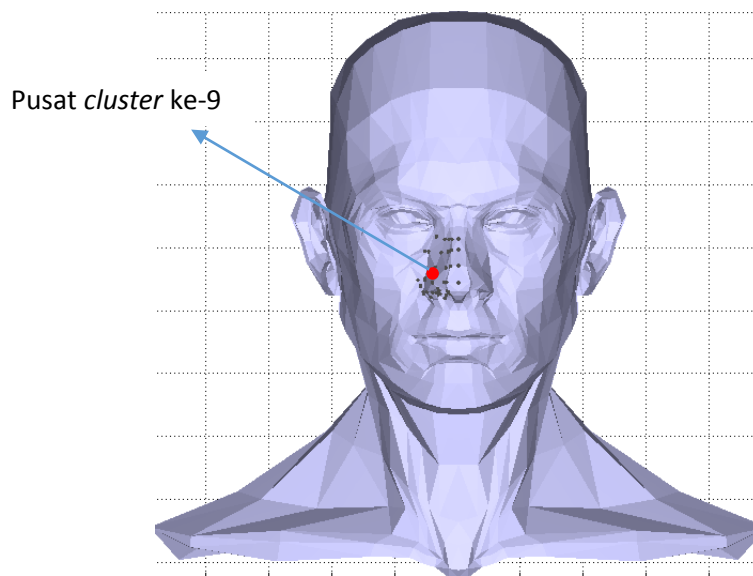


Gambar 3.22 Area *cluster* ke-7 di bawah mata kanan

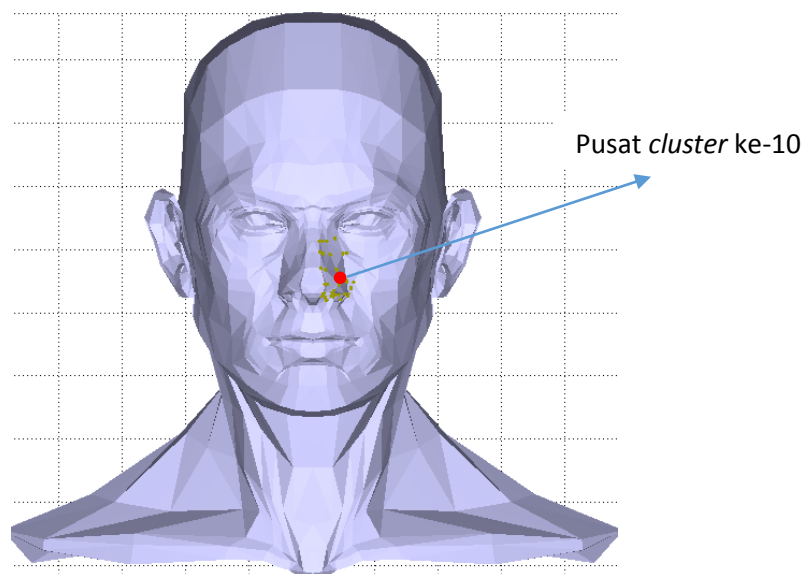


Gambar 3.23 Area *cluster* ke-8 di bawah mata kiri

Area pergerakan seputar hidung dipengaruhi oleh keberadaan pusat *cluster* ke-9 dan pusat *cluster* ke-10 dengan masing-masing menangani area sisi hidung sebelah kiri, *cluster* ke-9(Gambar 3.24), dan area sisi hidung sebelah kanan, *cluster* ke-10(Gambar 3.25).

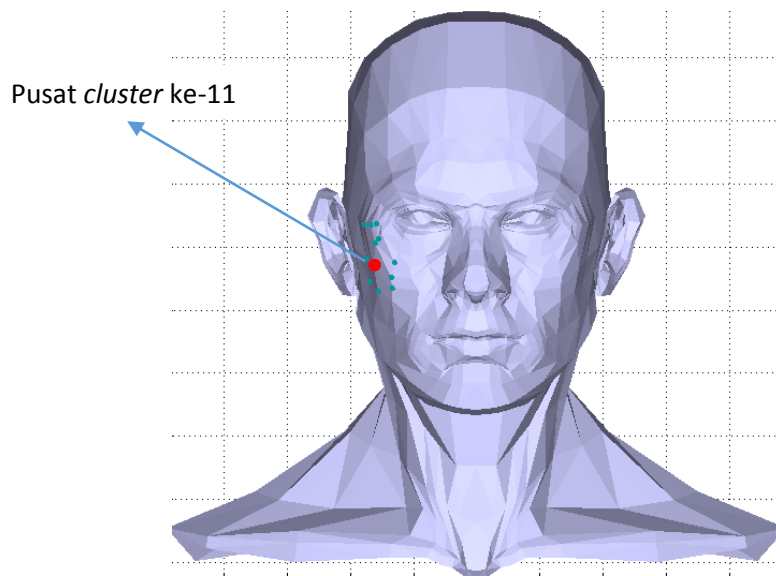


Gambar 3.24 Area *cluster* ke-9 di sisi hidung sebelah kiri

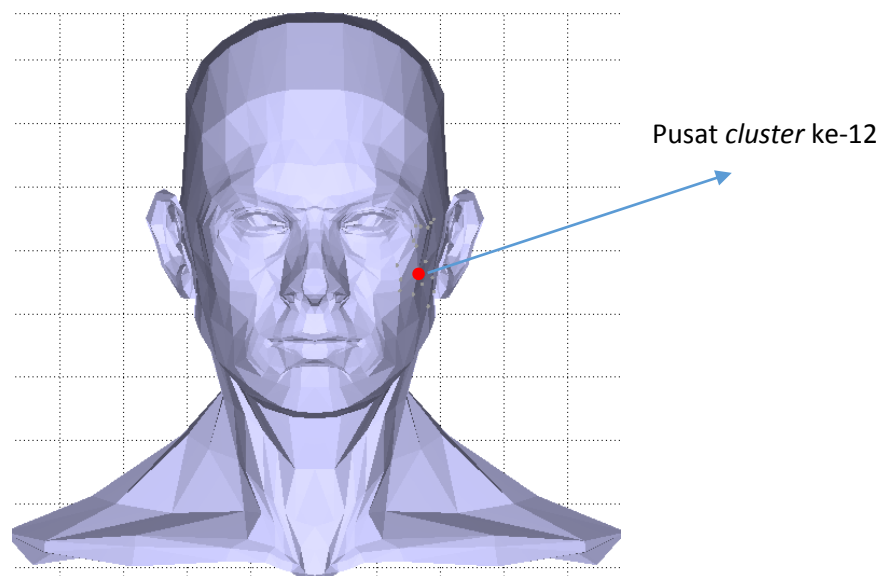


Gambar 3.25 Area *cluster* ke-10 di sisi hidung sebelah kanan

Cluster ke-11 membentuk area pada sisi pipi sebelah kiri dengan pusat *cluster* ke-11 sebagai pusat pergerakannya, Gambar 3.26. Area pada sisi pipi sebelah kanan dibentuk oleh *cluster* ke-12 dengan pusat pergerakan pada posisi pusat *cluster* ke-12, Gambar 3.27.

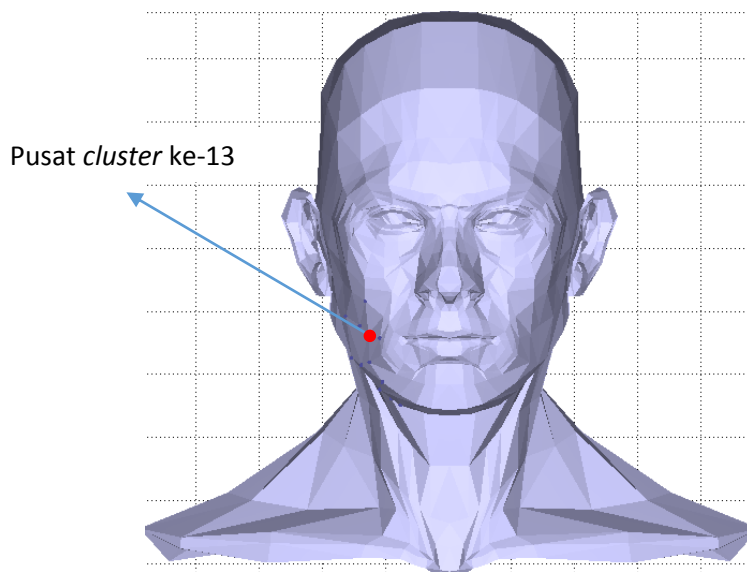


Gambar 3.26 Area *cluster* ke-11 di sisi pipi sebelah kiri

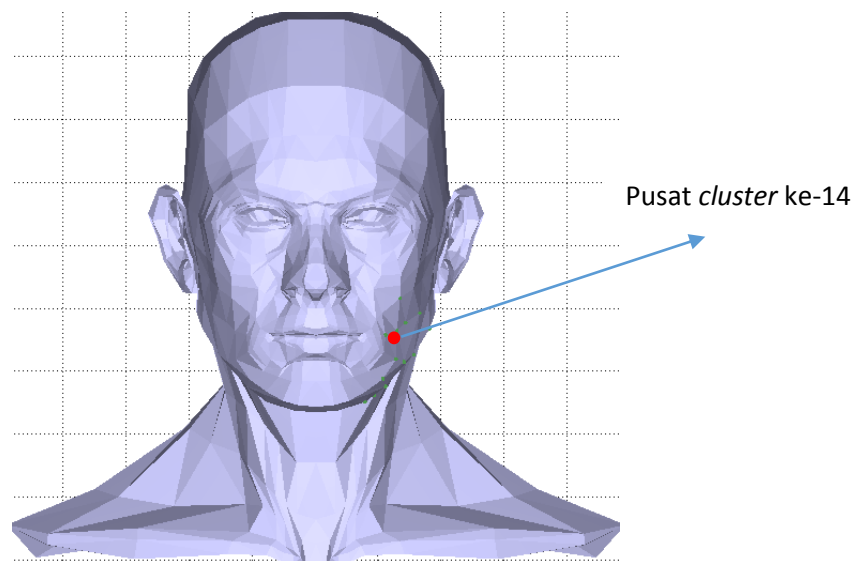


Gambar 3.27 Area *cluster* ke-12 di sisi pipi sebelah kanan

Area rahang kiri dibentuk dari posisi pusat *cluster* ke-13 dengan cakupan mulai sisi kiri rahang bawah bagian atas sampai bagian bawah dan dinamakan area *cluster* ke-13, Gambar 3.28. Begitu juga untuk area rahang kanan yang berpusat pada pusat *cluster* ke-14 dan cakupan area dari sisi kanan rahang bawah bagian atas sampai bagian bawah dan dinamakan *cluster* ke-14, Gambar 3.29.

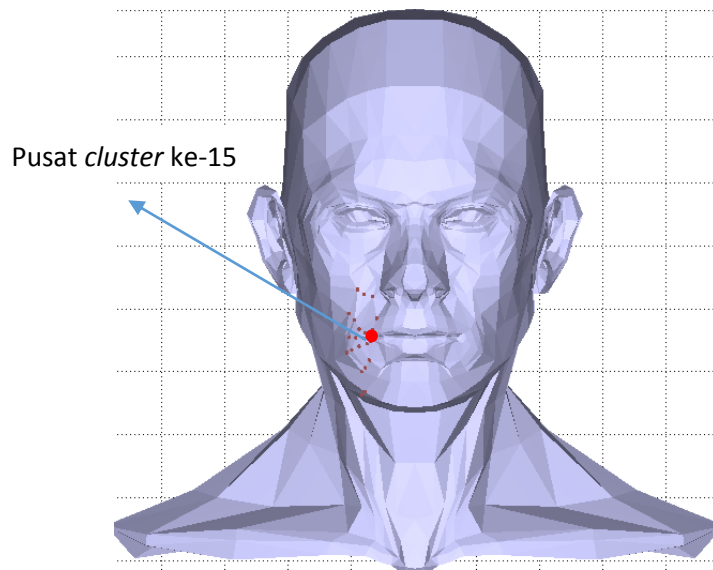


Gambar 3.28 Area *cluster* ke-13 di sisi kiri rahang bawah

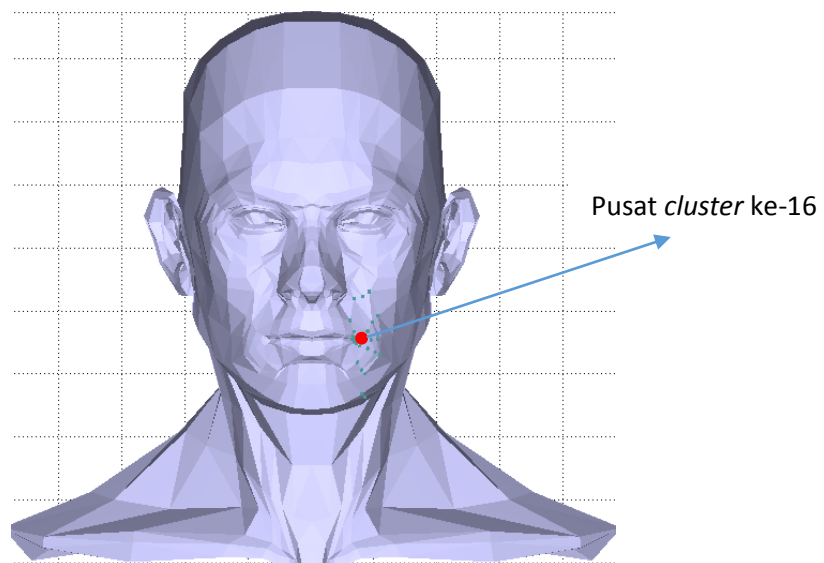


Gambar 3.29 Area *cluster* ke-14 di sisi kanan rahang bawah

Cluster ke-15 adalah area terpengaruh-gerak yang berpusat pada ujung bibir kiri yang berfungsi sebagai pusat *cluster* ke-15, Gambar 3.30. Sedangkan area terpengaruh-gerak yang berpusat pada ujung bibir bagian kanan selaku pusat *cluster*-nya dinamakan area *cluster* ke-16, Gambar 3.31.

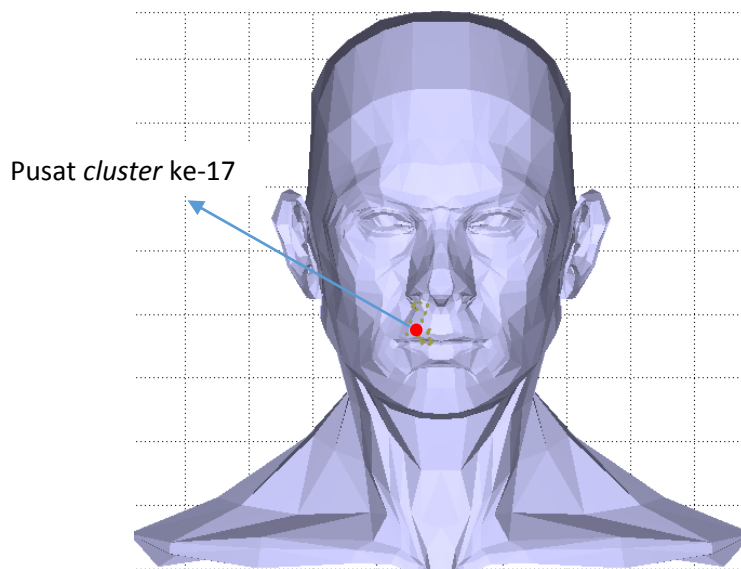


Gambar 3.30 Area *cluster* ke-15 di ujung bibir kiri



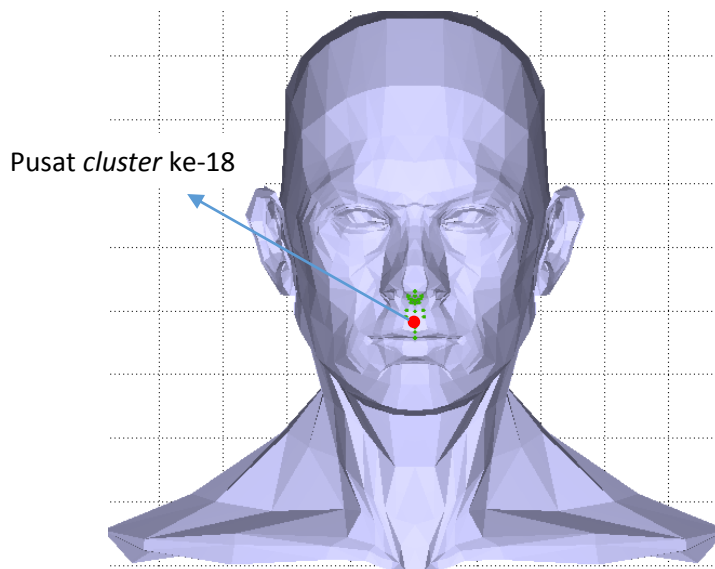
Gambar 3.31 Area *cluster* ke-16 di ujung bibir kanan

Pergerakan mulut bagian atas, termasuk area bibir bagian atas, dibagi menjadi 3 area *cluster* yang akan berfungsi membentuk pose pergerakan yang terjadi pada area mulut bagian atas. Area *cluster* bibir atas bagian kiri dinamakan sebagai area *cluster* ke-17, Gambar 3.32, dan berpusat pada pusat *cluster* ke-17.

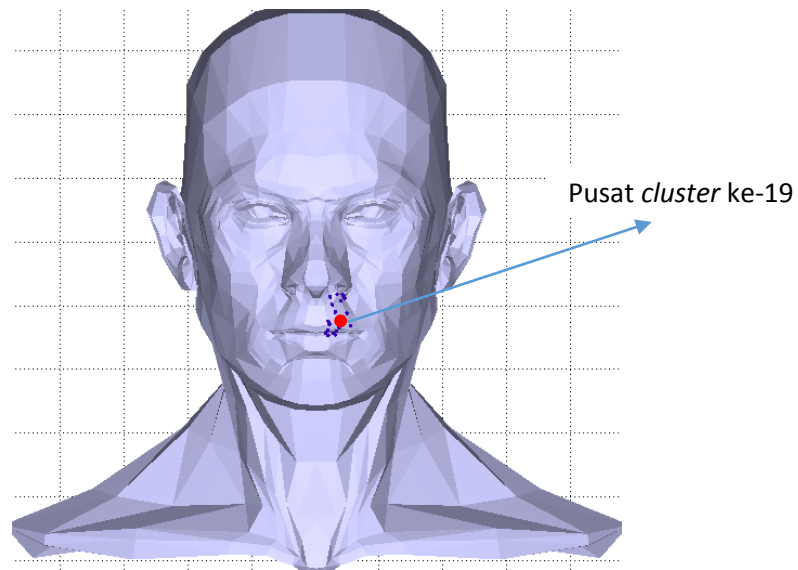


Gambar 3.32 Area *cluster* ke-17 di bibir atas bagian kiri

Area *cluster* bibir atas bagian tengah dinamakan sebagai area *cluster* ke-18, Gambar 3.33, dan berpusat pada pusat *cluster* ke-18. Begitu juga untuk area *cluster* bibir atas bagian kanan dinamakan sebagai area *cluster* ke-19, Gambar 3.34, dan berpusat pada pusat *cluster* ke-19.

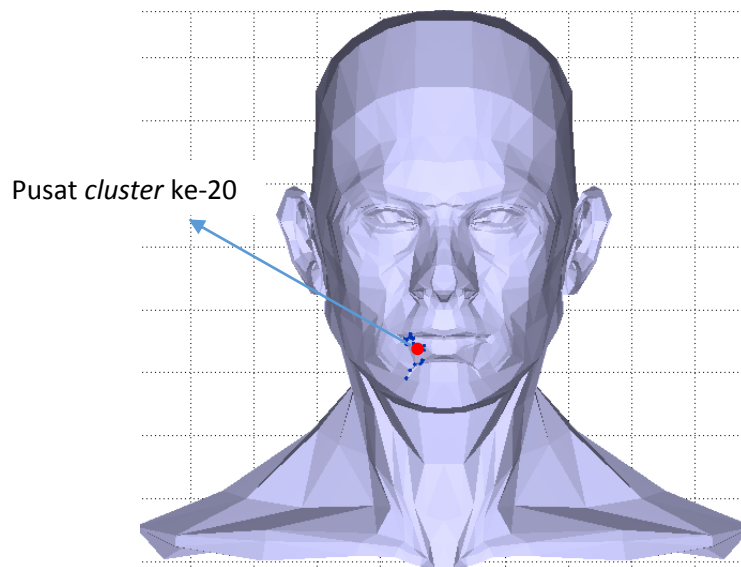


Gambar 3.33 Area *cluster* ke-18 di bibir atas bagian tengah



Gambar 3.34 Area *cluster* ke-19 di bibir atas bagian kanan

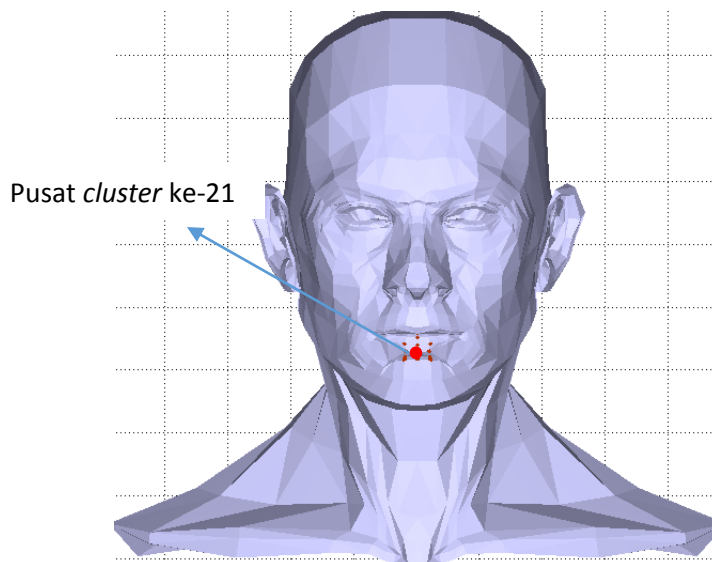
Pergerakan mulut bagian bawah, termasuk area bibir bagian bawah, dibagi menjadi 3 area *cluster* yang akan berfungsi membentuk pose pergerakan yang terjadi pada area mulut bagian bawah seperti halnya pada pembentukan area mulut bagian atas. Area *cluster* bibir bawah bagian kiri dinamakan sebagai area *cluster* ke-20, Gambar 3.35, dan berpusat pada pusat *cluster* ke-20.



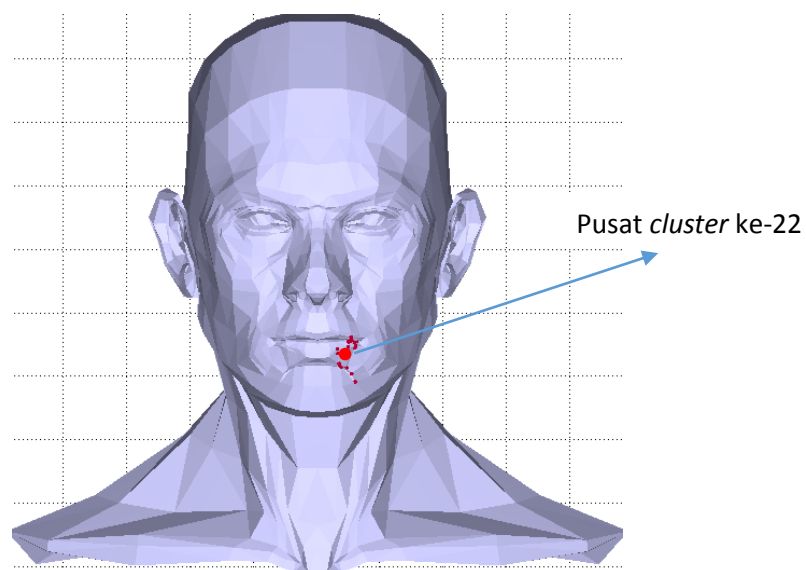
Gambar 3.35 Area *cluster* ke-20 di bibir bawah bagian kiri

Area *cluster* bibir bawah bagian tengah dinamakan sebagai area *cluster* ke-21, Gambar 3.36, dan berpusat pada pusat *cluster* ke-21. Begitu juga untuk area *cluster*

bibir bawah bagian kanan dinamakan sebagai area *cluster* ke-22, Gambar 3.37, dan berpusat pada pusat *cluster* ke-22.

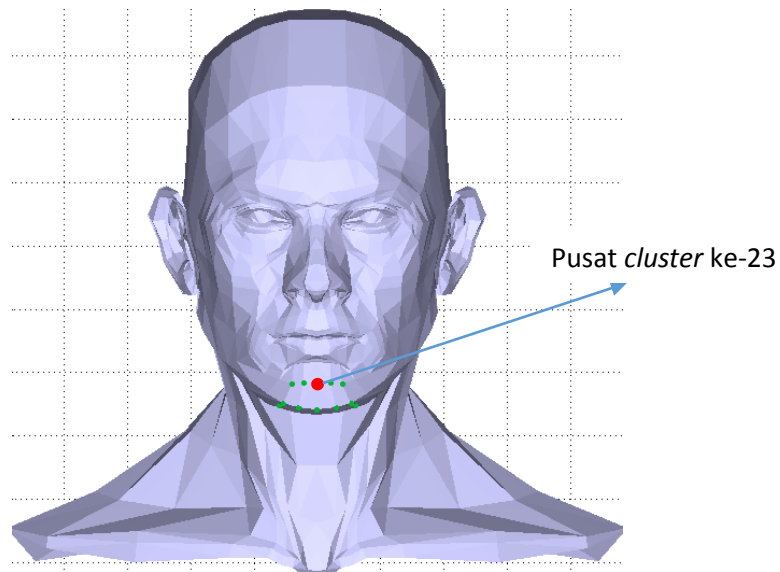


Gambar 3.36 Area *cluster* ke-21 di bibir bawah bagian tengah



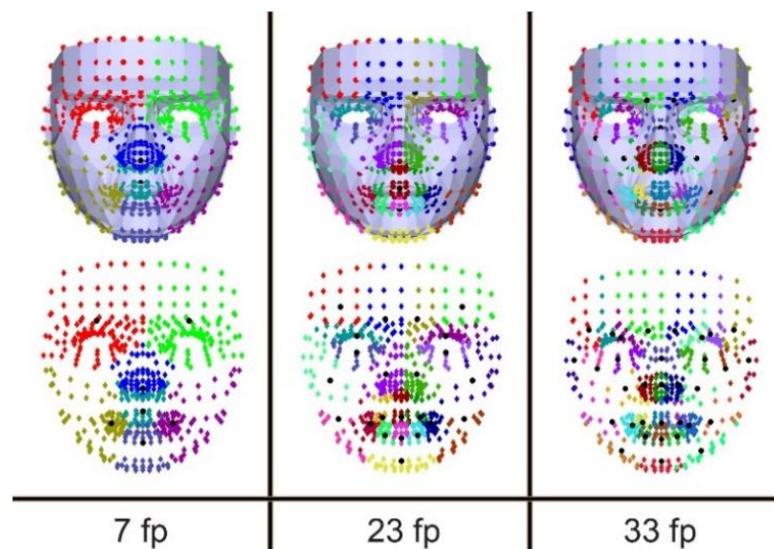
Gambar 3.37 Area *cluster* ke-22 di bibir bawah bagian kanan

Area *cluster* ke-23 merupakan area terpengaruh-gerak di seputar area dagu yang berpusat pada pusat *cluster* ke-23, Gambar 3.38. Setiap pergerakan dagu akan mempengaruhi perubahan posisi di area ini.



Gambar 3.38 Area *cluster* ke-23 di bagian tengah dagu

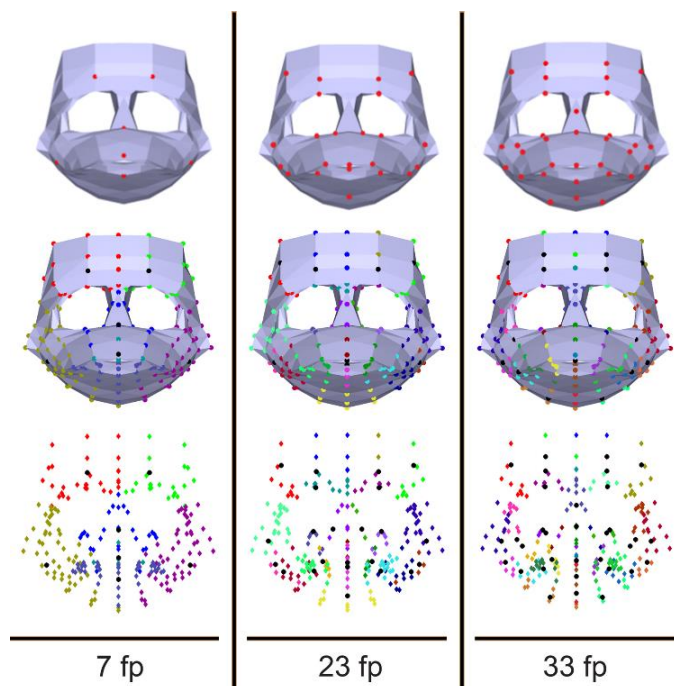
Hasil proses *feature-point clustering* untuk jumlah *feature-point* 7, 23 dan 33 pada model 3D wajah *low polygon* yang memiliki jumlah *vertex* 3324 tampak pada Gambar 3.39. Setiap *vertex* pada wajah dapat dikelompokkan menjadi anggota *cluster* yang memiliki pusat terdekat terhadap *vertex* tersebut. Banyaknya area *cluster* yang akan menjadi area bobot pada perubahan nantinya sebanyak nilai *feature-point* atau titik *rigging* yang digunakan pada proses penganimasian.



Gambar 3.39 Hasil *feature-points clustering* untuk model wajah manusia 3D dengan 3324 vertek (model *low-poly*)

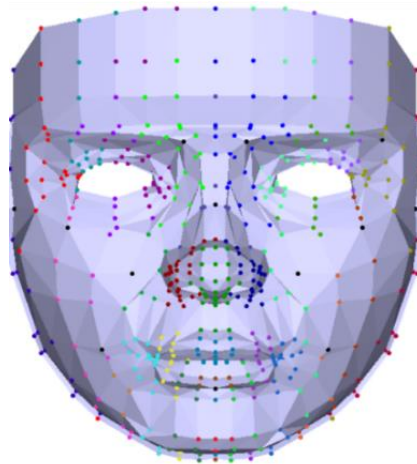
Segmentasi area gerak pada wajah 3D model manusia telah diterapkan menggunakan titik *rigging* yang disebut sebagai *feature-point* pada proses *clustering*. Hasil yang didapatkan dengan menggunakan variasi jumlah *feature-point* dapat menghasilkan area segmentasi dengan baik dan memungkinkan untuk dilakukan pengujian pada model 3D wajah lainnya termasuk pada wajah karakter kartun.

Area-area yang terbentuk tersebut diinisialisasi sebagai area bobot yang memiliki fungsi sebagai area batasan gerak yang dipengaruhi oleh masing-masing pusat gerak, dalam hal ini letak *feature-point* yang ditandai dengan letak *rigging*. Area bobot berhubungan dengan berbagai pengaruh yang terjadi pada permukaan wajah sebagai akibat dari terjadinya perubahan pose *frame-by-frame*. Area bobot yang sensitif terhadap tata letak *rigging* dan bentuk permukaan wajah mempengaruhi kualitas gerakan animasi dan ekspresi wajah yang dihasilkan. Percobaan pembentukan area bobot dilakukan pada model 3D dari karakter wajah kartun. Masing-masing model 3D diproses menggunakan referensi titik fitur sejumlah 7, 23, dan 33 berdasarkan lokasi *rigging* dengan *feature-points clustering*, Gambar 3.40.



Gambar 3.40 Hasil pembentukan *cluster* sebagai area bobot untuk model wajah kartun 3D dengan 1260 *vertex* (model *low poly*).

Pendekatan berbeda pada perhitungan jarak untuk kasus model wajah 3D perlu dilakukan untuk menguji apakah ada perbedaan yang signifikan pada hasil akhir *clustering*. Pada pembahasan ini model wajah 3D memiliki kedalaman dan jarak terpendeknya bukanlah garis lurus seperti pada perhitungan dua titik menggunakan *euclidean*, melainkan garis kurva yang mengikuti bentuk permukaan objek 3D (Caesar, Suyoto, & Gunanto, 2016). Rumus penghitungan jarak yang digunakan dinamakan penghitungan *geodesic distance* metode *haversine*. Rumus ini cocok digunakan untuk perhitungan jarak berdasarkan koordinat bola untuk mencari jarak terpendek. Perubahan pada tahapan segmentasi terletak pada proses penentuan anggota *vertex* dari model wajah 3D kedalam keanggotaan berdasarkan *feature-point* digunakan pendekatan keanggotaan *feature-points clustering* dengan terlebih dahulu dilakukan proses transformasi sistem koordinat dari kartesian ke sistem koordinat bola sebelum dilakukan perhitungan jaraknya menggunakan metode perhitungan jarak *haversine*. Hasil akhir proses *feature-points clustering* dengan 33 titik *feature-points* pada model 3D wajah manusia dapat dilihat pada Gambar 3.41.

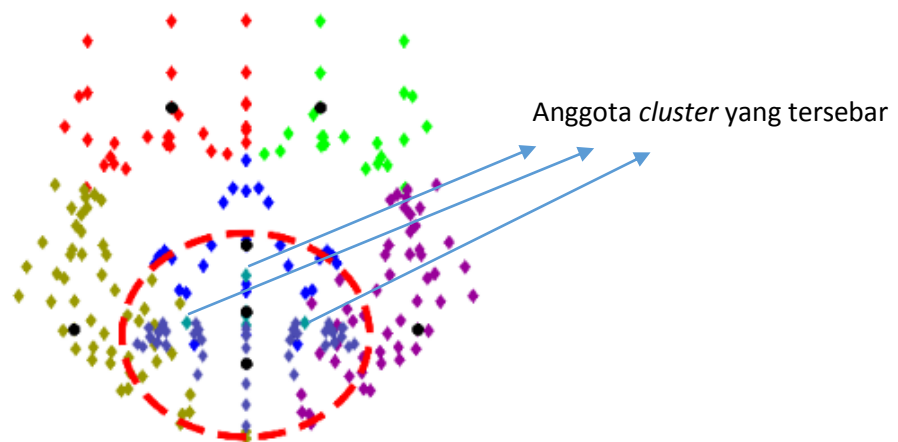


Gambar 3.41 Hasil segmentasi dengan 33 titik *feature-points* dan pendekatan perhitungan jarak *haversine* pada model 3D wajah manusia.

Hasil pengamatan segmentasi yang terbentuk menggunakan perhitungan jarak minimal di model 3D wajah manusia menggunakan rumus *haversine* di sistem koordinat bola memiliki hasil yang serupa dan tidak memiliki perbedaan yang signifikan dengan penggunaan perhitungan jarak *euclidean* di sistem koordinat

kartesian. Adanya tahapan proses transformasi sistem koordinat dari sistem koordinat kartesian ke sistem koordinat bola sebelum dilakukannya perhitungan jarak akan menambahkan beban komputasi pada sistem, sehingga jika ingin menghemat proses komputasi pada pendekatan sistem dengan proses *realtime*, maka disarankan menggunakan sistem koordinat kartesian dan perhitungan jarak *euclidean* untuk melakukan *feature-points clustering*.

Setelah dilakukan pengamatan hasil *clustering* pada model 3D wajah karakter kartun yang memiliki wajah terdeformasi seperti halnya pada wajah karakter angsa, Gambar 3.42, terlihat ada kesalahan pembentukan *cluster* di area mulut dikarenakan anggota *cluster* yang tersebar lintas area *cluster* lainnya. Hal ini mempengaruhi kualitas hasil deformasi wajah jika dilakukan pada area *cluster* tersebut, sehingga perlu solusi yang mampu memperbaiki area *cluster* yang terbentuk jika diaplikasikan pada bentuk wajah terdeformasi.



Gambar 3.42 Kesalahan pembentukan *cluster* di area mulut terdeformasi dikarenakan anggota *cluster* yang tersebar lintas area *cluster* lainnya

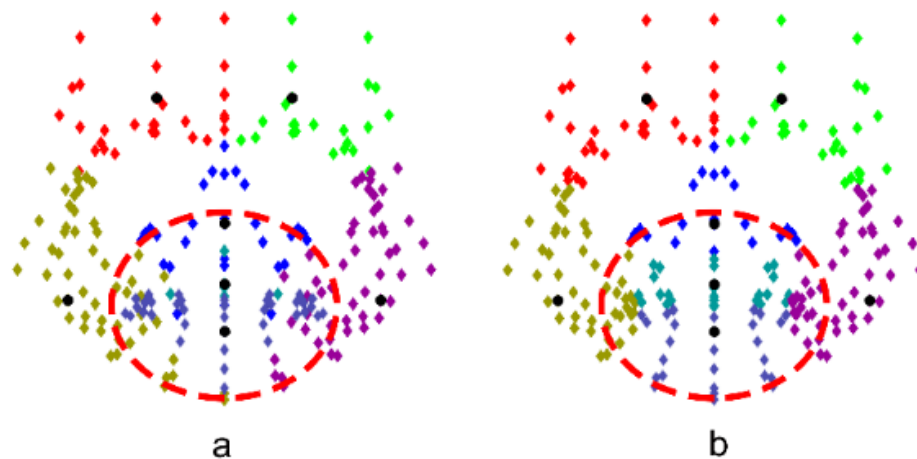
Penanganan permasalahan tersebut dapat diatasi dengan membuat proyeksi peta ortogonal dari model 3D wajah terlebih dahulu. Proyeksi *orthographic* (atau proyeksi ortogonal) adalah sebuah teknik untuk mewakili objek tiga dimensi dalam dua dimensi. Ini adalah bentuk proyeksi paralel, di mana semua garis proyeksinya ortogonal ke bidang proyeksi (Maynard, 2005). Pada langkah ini diproyeksikanlah wajah dan *feature-point*-nya secara ortogonal ke bidang XY atau

bidang $z = 0$. Proses ini dilakukan dengan menghitung masing-masing koordinat *vertex* dengan menggunakan Persamaan 3.22.

$$P_{ortho} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

sehingga hasil untuk $P_{orto} = [x, y, 0]$.

Proses pembuatan peta ortogonal dari model 3D wajah dilakukan sebelum dilakukannya proses *clustering* sehingga tahapan ini adalah tahapan pendahuluan sebelum *clustering* dilakukan. Setelah perbaikan dilakukan, maka didapatkan hasil *cluster* yang telah tersentral yang tidak saling menyeberang atau tumpang tindih. Gambar 3.43 merupakan hasil perbandingan kondisi sebelum dilakukannya perbaikan area *cluster* dengan kondisi setelah dilakukannya perbaikan menggunakan pendekatan proyeksi peta ortogonal pada model 3D wajah karakter kartun yang memiliki ciri mulut terdeformasi, karakter angsa.

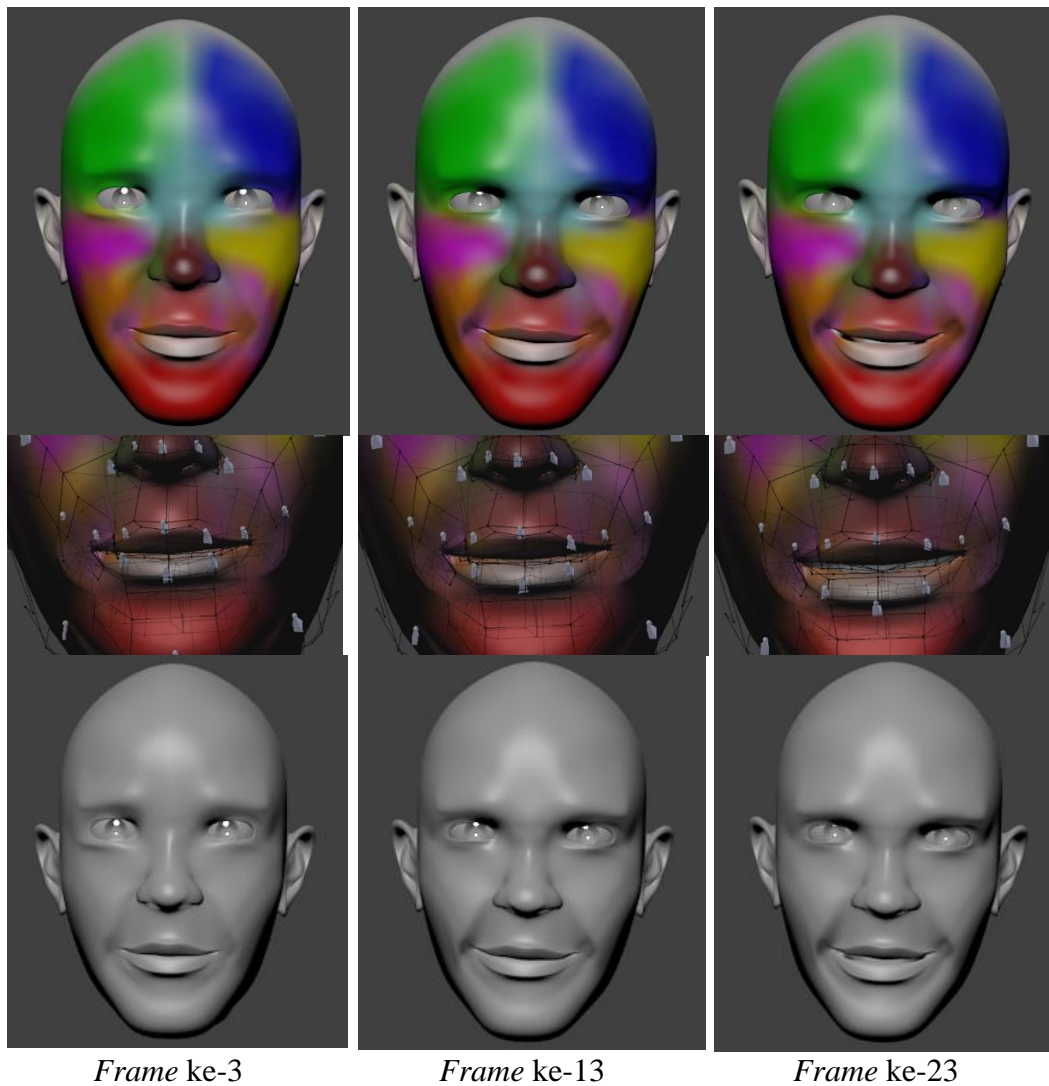


Gambar 3.43 Perbandingan hasil *clustering*: a) sebelum dilakukannya perbaikan area *cluster* dan b) kondisi setelah dilakukannya perbaikan menggunakan pendekatan proyeksi peta ortogonal pada model 3D wajah karakter kartun yang memiliki ciri mulut terdeformasi, karakter angsa.

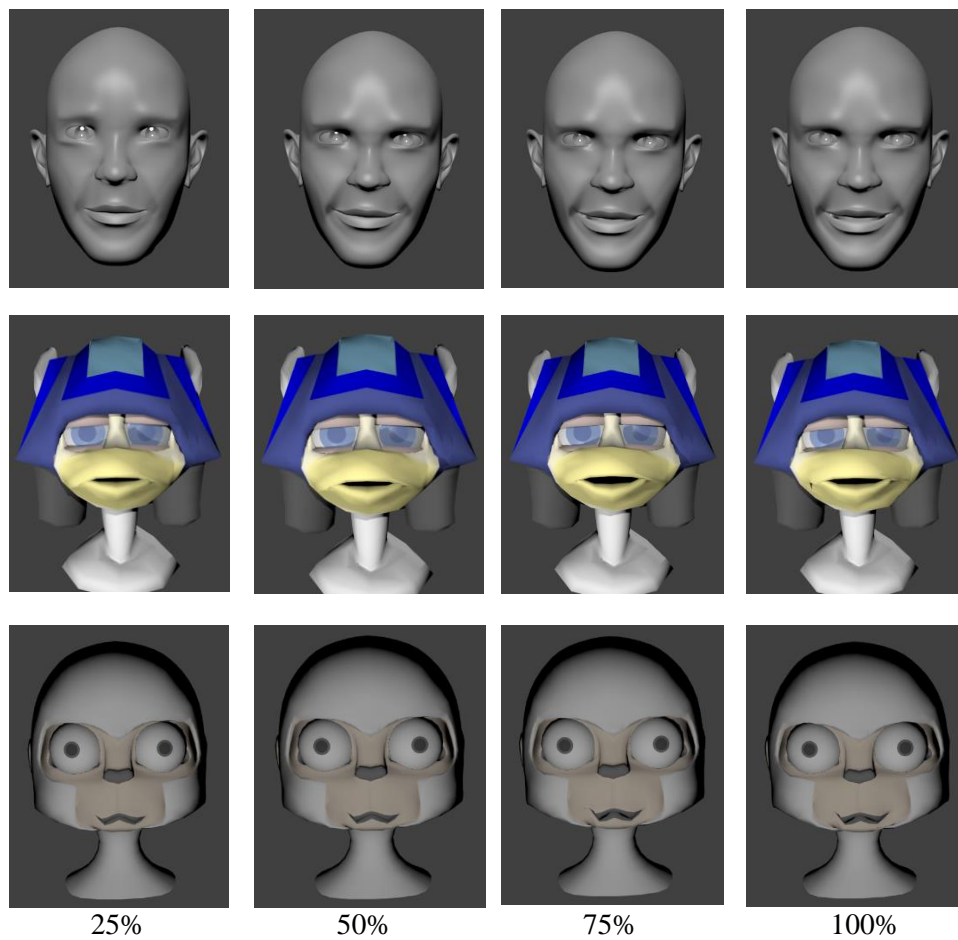
Hasil akhir menunjukkan bahwa memodifikasi proses *feature-point clustering* menggunakan peta wajah ortogonal dapat memperbaiki peletakan *vertex* yang salah pada pembentukan *cluster*. Wilayah ini membentuk kesatuan sebagai satu wilayah. Hal ini menunjukkan bahwa dengan menggunakan modifikasi ini dapat meningkatkan hasil secara visual dan obyektif seperti pada Gambar 3.43.

Area mulut biasanya memiliki satu area yang terhubung, sehingga efeknya dapat meningkatkan kualitas deformasi pada wajah.

Hasil sintesis ekspresi emosi pada wajah karakter virtual 3D berbasis *feature-point cluster* untuk ekspresi senang dapat dilihat pada Gambar 3.44 dan Gambar 3.45. Gambar 3.44 memperlihatkan hasil visualisasi sebagian besar *cluster* yang terbentuk di area wajah karakter manusia yang diambil pada kondisi *frame* ke-3, 13 dan 23. Variasi tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100% dapat dilihat pada Gambar 3.45.

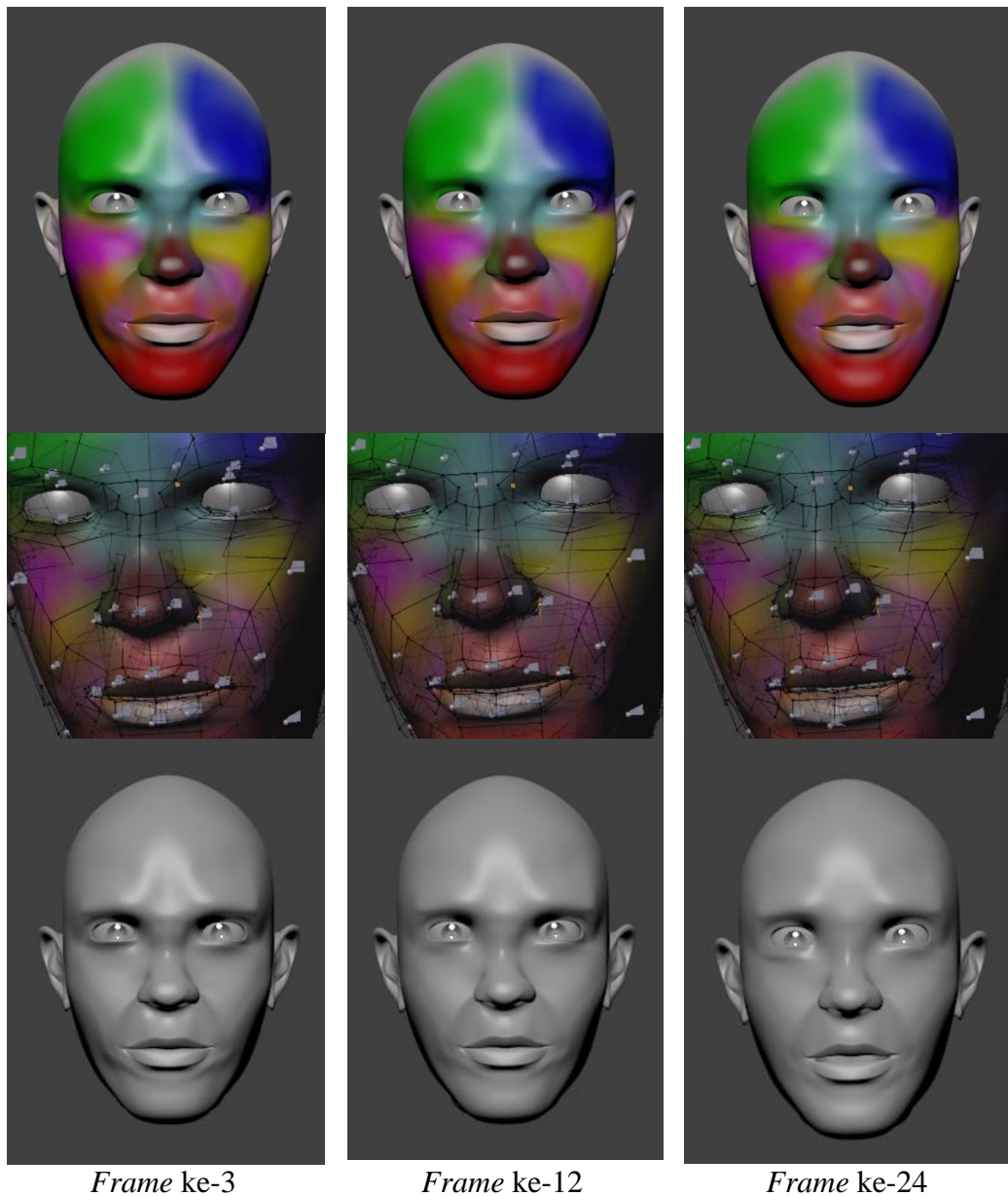


Gambar 3.44 Hasil sintesis ekspresi senang berbasis *feature-point cluster* di karakter wajah manusia pada *frame* ke-3, 13 dan 23.



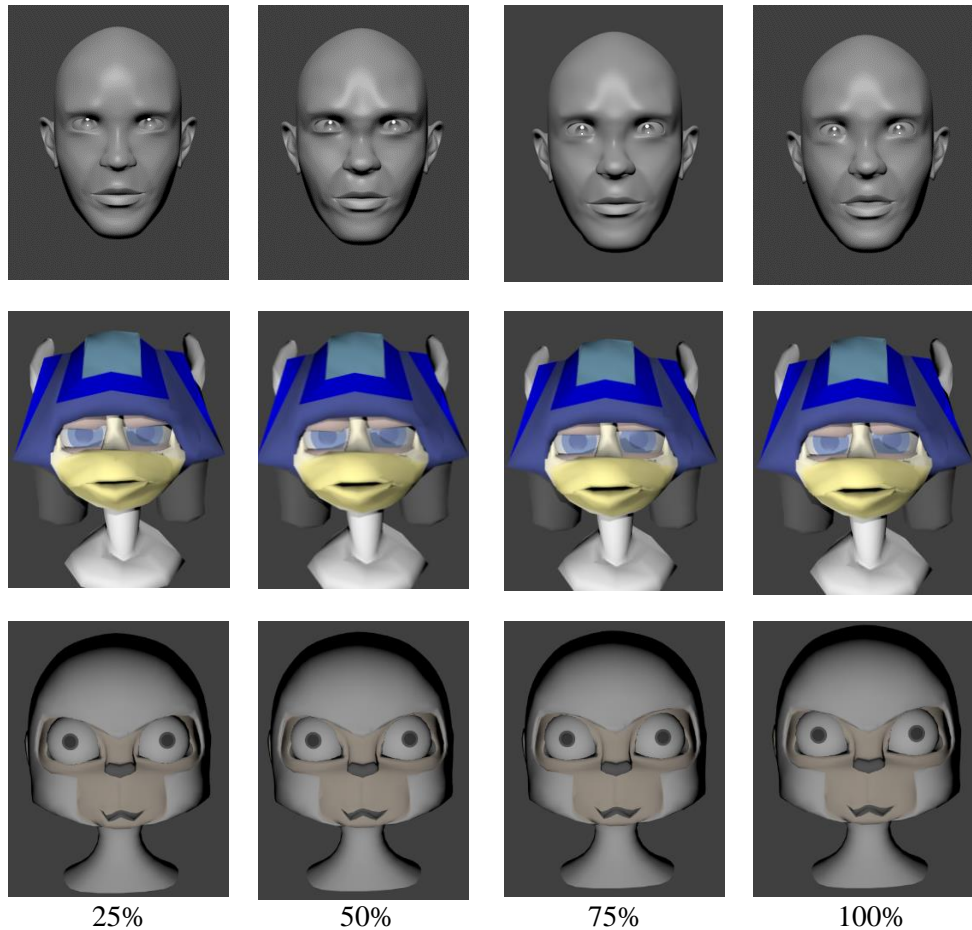
Gambar 3.45 Visualisasi sintesis ekspresi senang dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%.

Sintesis ekspresi marah yang menggunakan basis *feature-point cluster* sebagai acuan perubahan pose *frame-by-frame* dapat dilihat pada Gambar 3.46 dengan mencuplik hasil pada *frame* ke-3, 12 dan 24. Sedangkan hasil variasi tingkatan persentase emosi 25%, 50%, 75% dan 100% dapat dilihat pada Gambar 3.47.



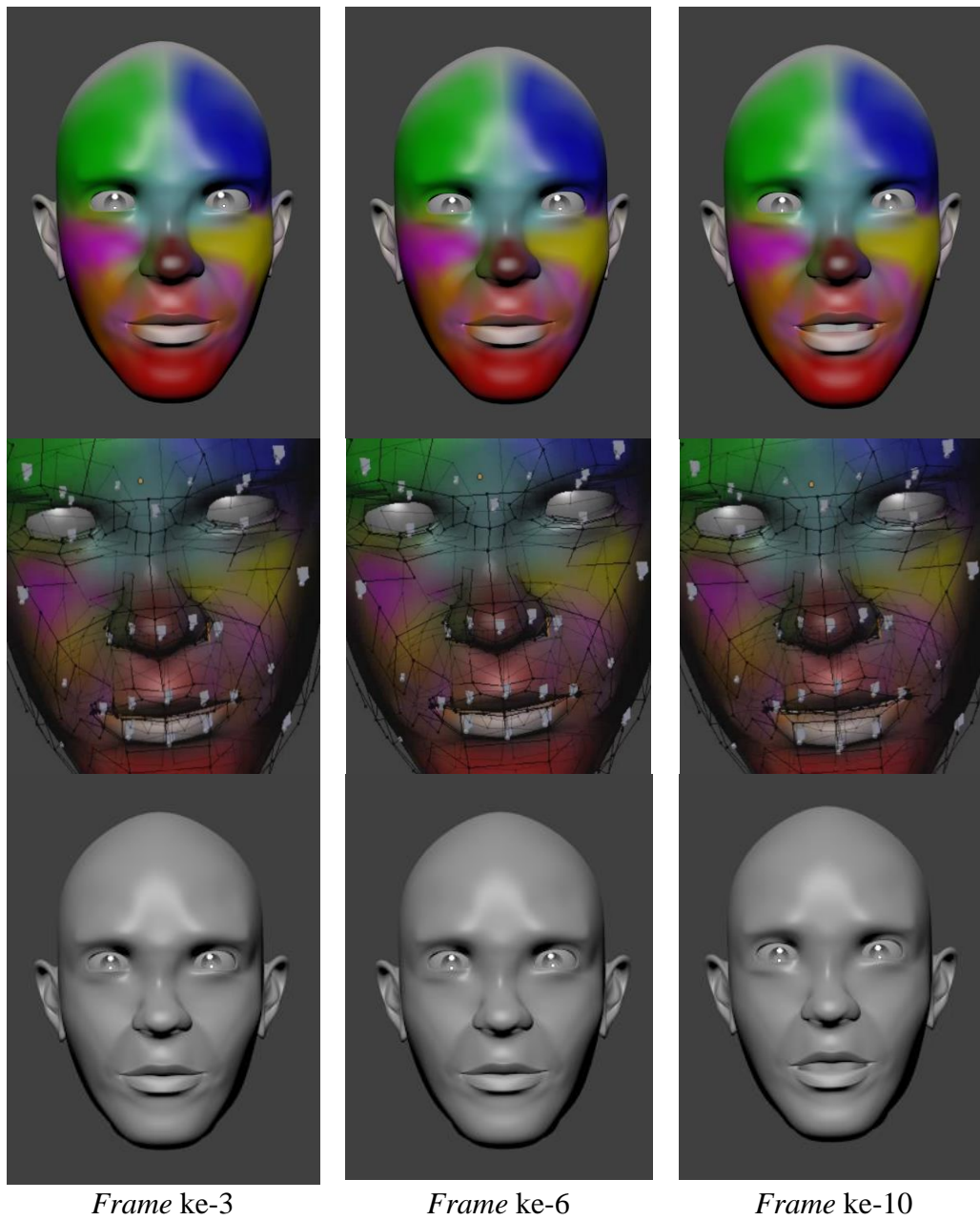
Gambar 3.46 Hasil sintesis ekspresi marah berbasis *feature-point cluster* di karakter wajah manusia pada frame ke-3, 12 dan 24.

Pada ekspresi marah gerakan perubahan tampak pada area dahi, mata yang sedikit membuka lebar dan mulut yang bergerak sedikit membuka. Perubahan ini tampak nyata pada model wajah manusia, sedangkan pada model kartun karakter angsa pergerakan dahi mempengaruhi gerak kelopak mata bagian atas dan pada karakter kera pada mata yang bergerak agak lebih terbuka lebar.



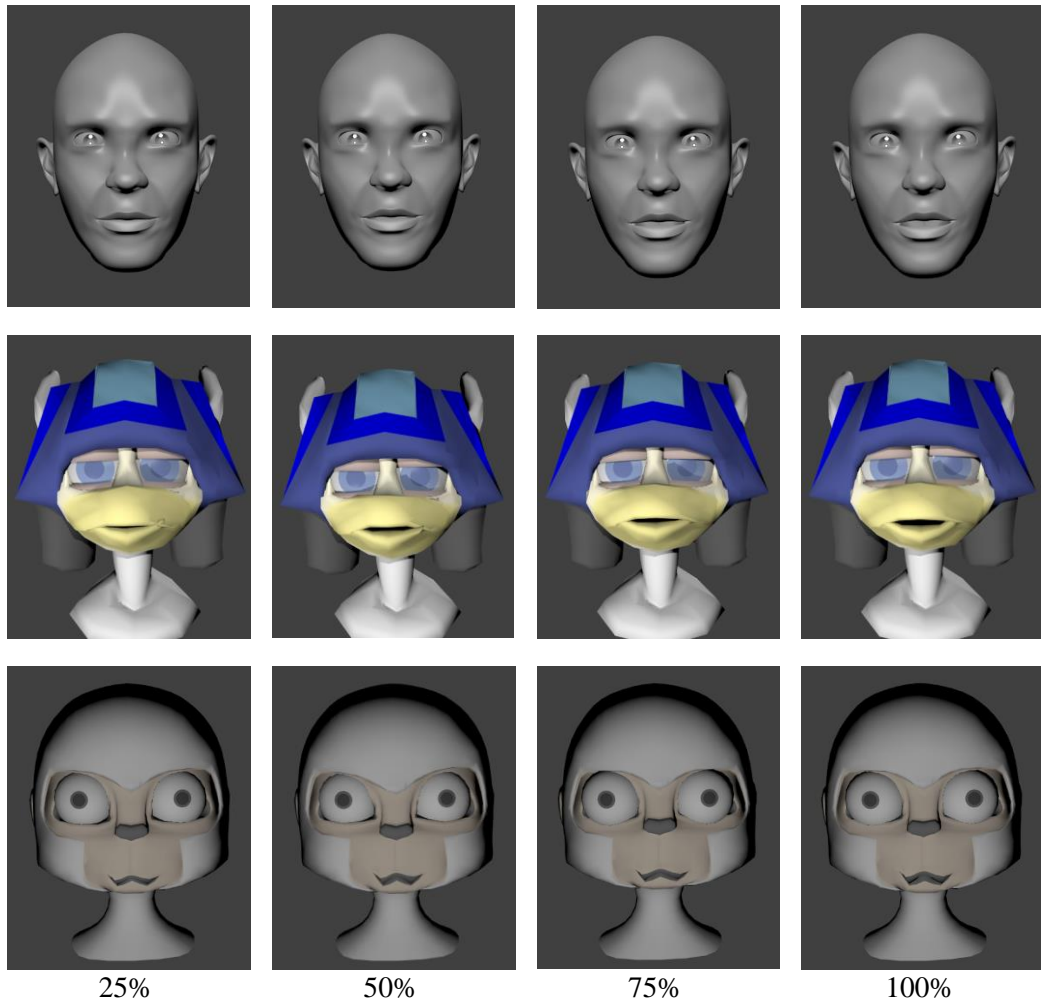
Gambar 3.47 Visualisasi sintesis ekspresi marah dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%

Begitu pula hasil sintesis ekspresi takut yang berbasis *feature-point cluster* untuk *frame* ke-3, 6 dan 10 pada Gambar 3.48 dan variasinya pada Gambar 3.49. Ekspresi senang, marah dan takut pada karakter manusia memiliki hasil visual yang terbaik dibandingkan hasil sintesis pada karakter angsa dan kera. Detail pergerakan pada dahi dan mata pada karakter manusia dapat terlihat lebih jelas dan secara persepsi visual mudah ditangkap oleh penonton.



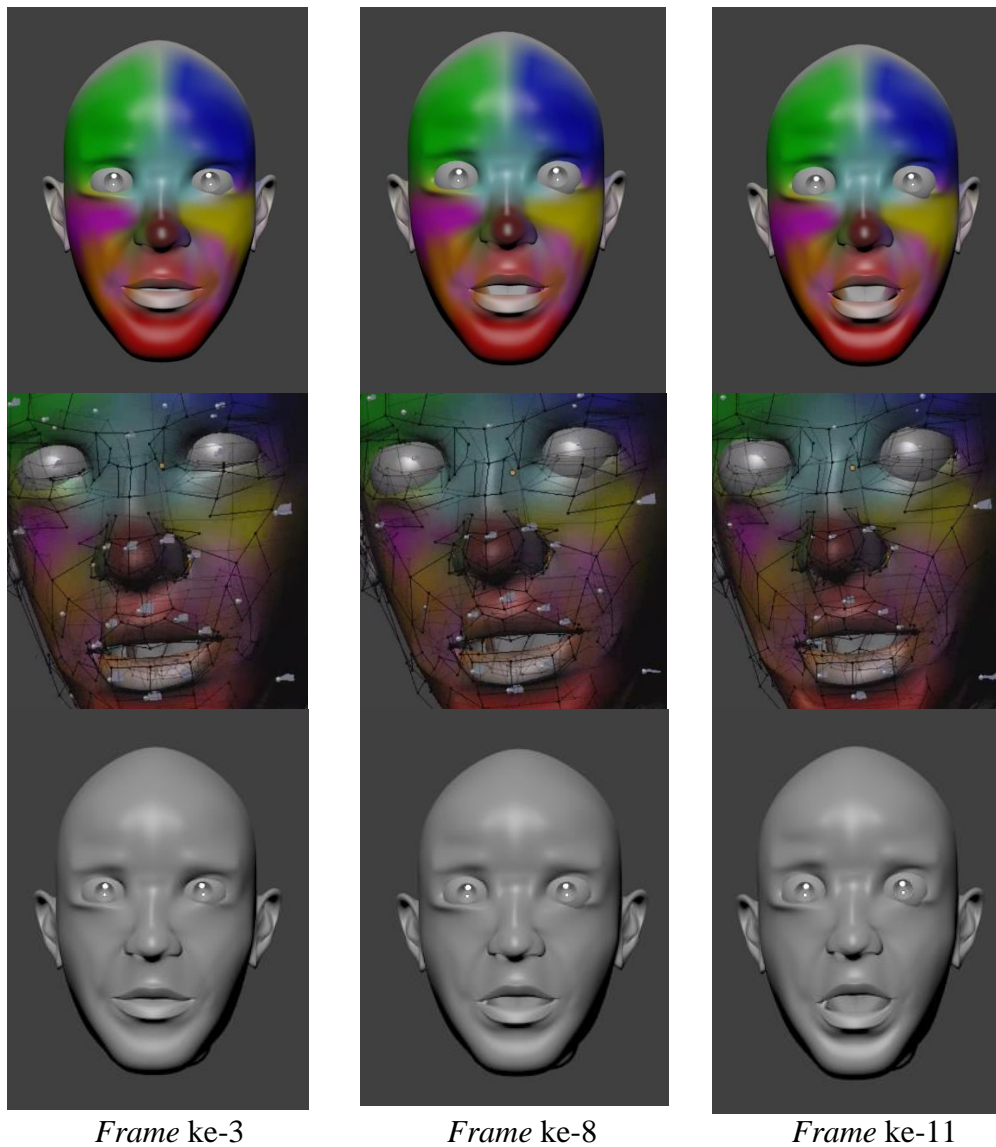
Gambar 3.48 Hasil sintesis ekspresi takut berbasis *feature-point cluster* di karakter wajah manusia pada frame ke-3, 6 dan 10.

Secara sekilas pada ekspresi takut hampir sama dengan hasil ekspresi marah, pembeda minor tampak pada hasil tingkatan persentase 50% dan 75% yang menunjukkan adanya pergerakan mulut yang terbuka dibandingkan saat ekspresi marah, Gambar 3.49. Mayoritas pada sintesis ekspresi takut, mulut bergerak membuka sehingga di setiap variasi tingkatannya secara visual tampak demikian.



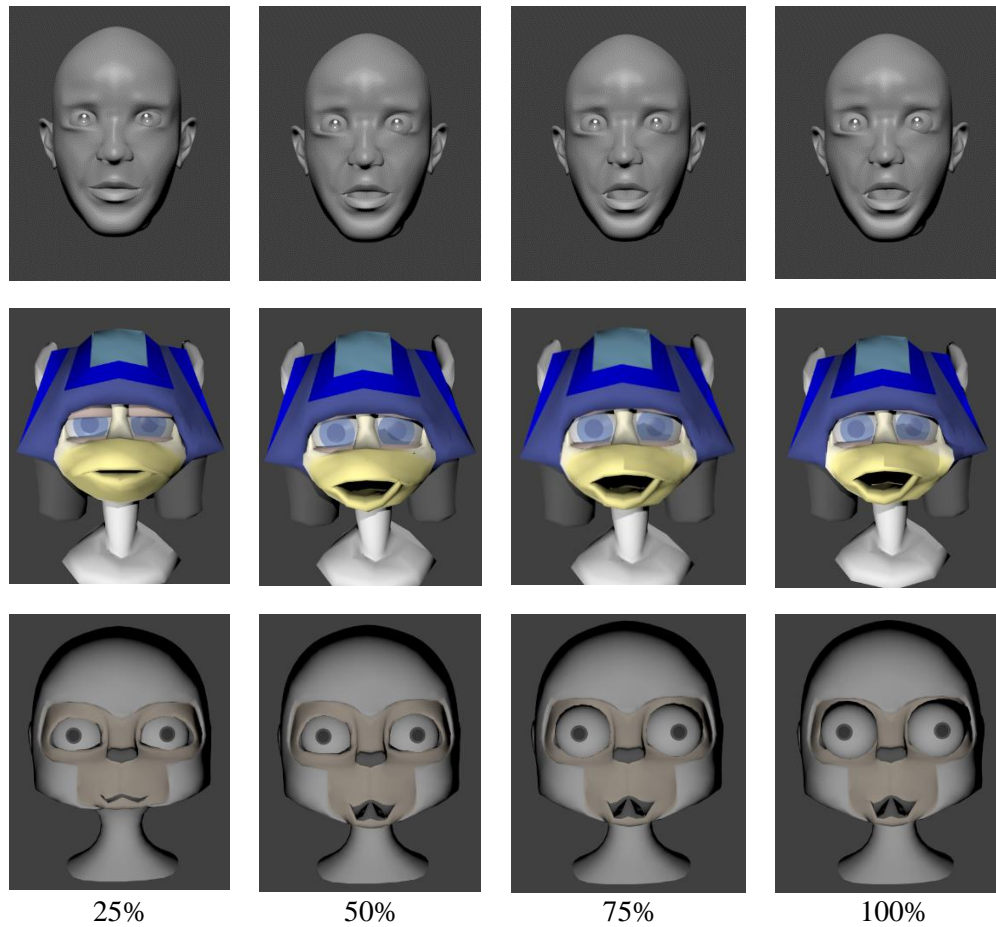
Gambar 3.49 Visualisasi sintesis ekspresi takut dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%

Pada sintesis ekspresi terkejut, kondisi mata yang terbuka lebar, alis terangkat dengan kelopak mata terbuka disertai mulut yang terbuka lebar dan dagu yang turun merupakan ciri yang mudah dikenali secara visual pada *frame* ke-3, 8 dan 11, Gambar 3.50. Hal ini juga yang membedakan tampilan visual antara ekspresi takut dan terkejut, sehingga walaupun bagian wajah yang bergerak hampir serupa, namun kesan ekspresi emosi yang didapatkan berbeda.



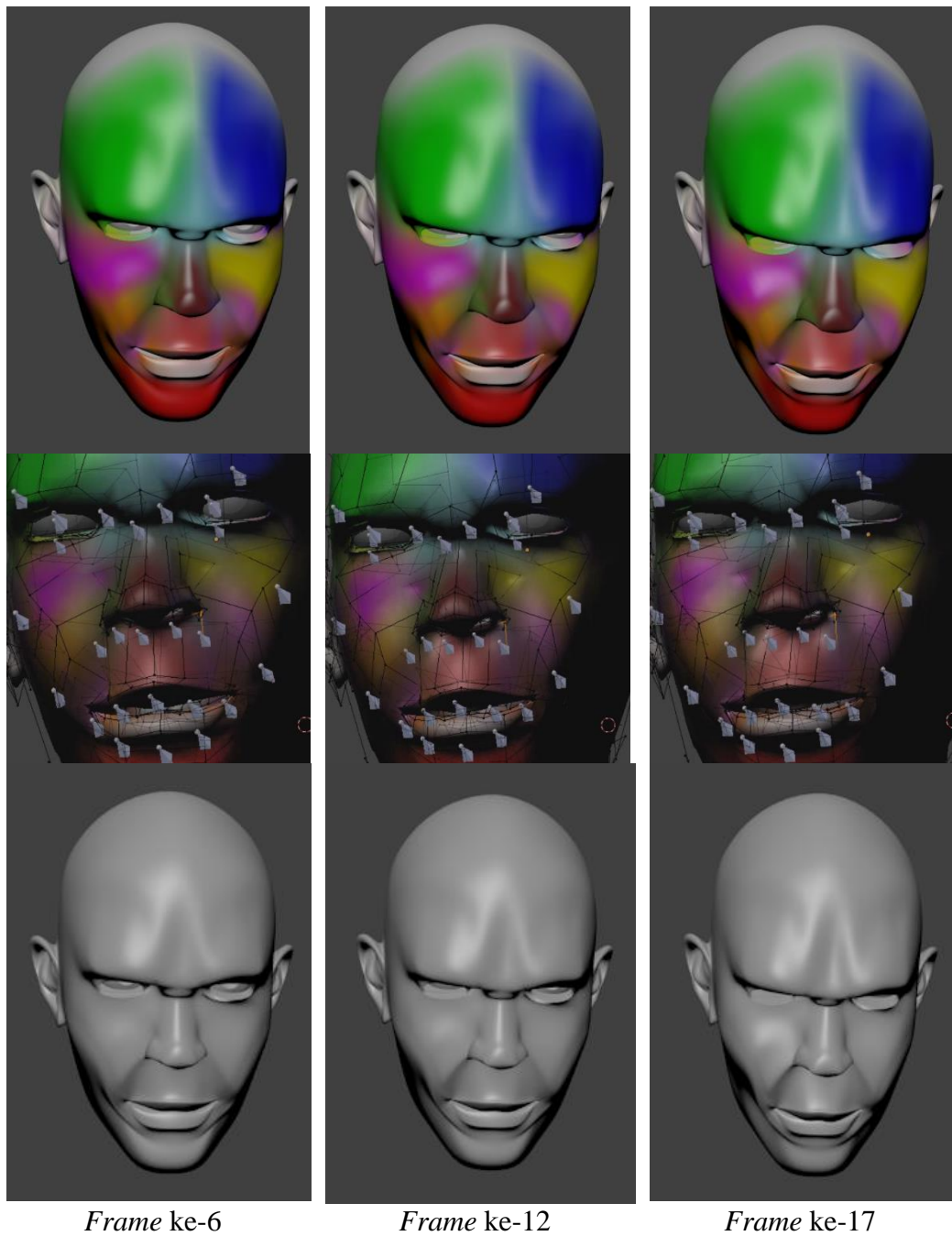
Gambar 3.50 Hasil sintesis ekspresi terkejut berbasis *feature-point cluster* di karakter wajah manusia pada frame ke-3, 8 dan 11.

Ekspresi terkejut merupakan respon yang cepat, sehingga puncak ekspresi memiliki jarak *frame* yang dekat, yaitu pada Gambar 3.50 jaraknya hanya 3 *frame* dari *frame* ke-8 sampai *frame* ke-11. Pengembangan sintesis ekspresi terkejut dengan variasi tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100% dapat dilihat pada Gambar 3.51. Ekspresi pada model karakter manusia, angsa dan kera memiliki tingkat ketepatan persepsi visual hampir sama dikarenakan ekspresi ini sangat mudah dikenali oleh penonton.



Gambar 3.51 Visualisasi sintesis ekspresi terkejut dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%

Sintesis ekspresi sedih dengan basis *feature-point cluster* berikut variasi tingkatan persentase emosi 25%, 50%, 75% dan 100% dapat dilihat pada Gambar 3.52 dan Gambar 3.53. Kondisi pergerakan yang terjadi sangat minim, sehingga membutuhkan pengamatan yang detail untuk mengenali perubahan yang terjadi, khususnya pada pergerakan bibir atas yang cenderung turun dan bentuk mulut membentuk lengkungan naik.

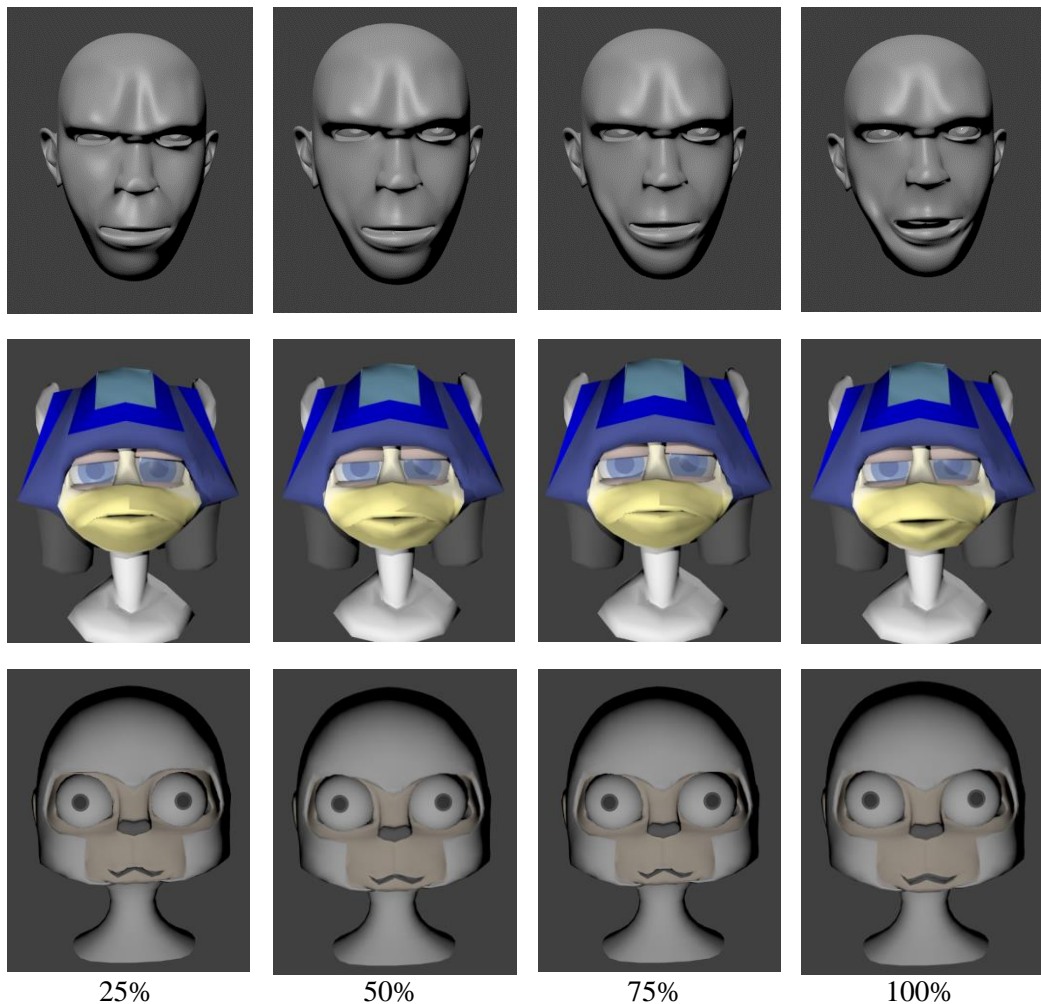


Gambar 3.52 Hasil sintesis ekspresi sedih berbasis *feature-point cluster* di karakter wajah manusia pada *frame* ke-6, 12 dan 17.

Pada sintesis ekspresi sedih karena pergerakan yang terjadi sangat sedikit, pengamatan visual hasil dari sintesis dapat dilakukan dari detail pergerakan mulut dan pergerakan kelopak mata serta dahi. Karakter manusia pergerakan dahi mudah

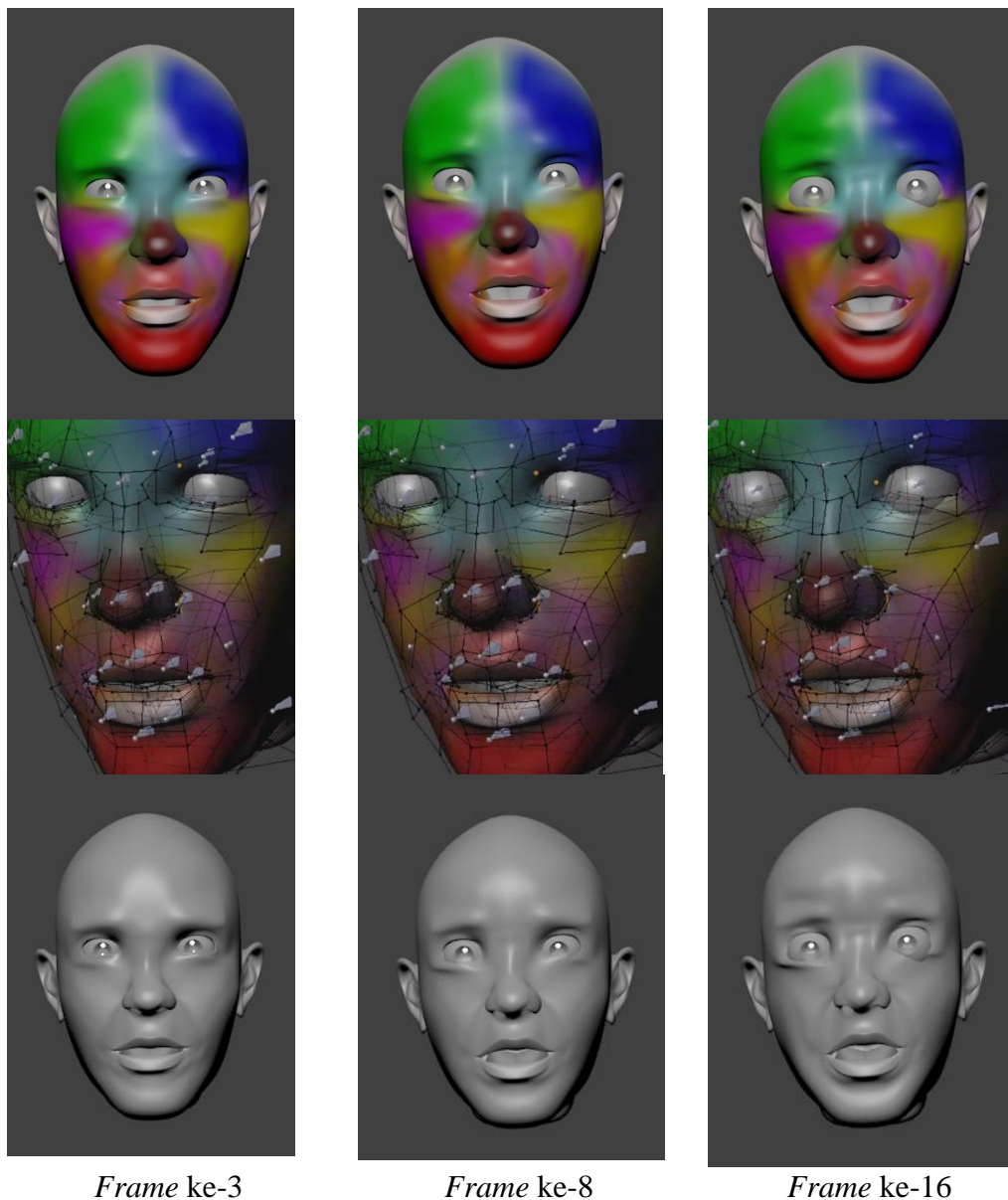
teramati, namun pada karakter kartun, angsa dan kera, lebih terlihat pada pergerakan mulut yang bergerak naik turun seperti bergetar.

Pada Gambar 3.53 dilakukan sintesis ekspresi sedih dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%. Perubahan kening dan gerakan sedikit menunduk menyebabkan kerusakan kualitas pada karakter manusia, sedangkan pada karakter angsa dan kera tidak terlalu berdampak. Justru pada karakter angsa, bentuk paruh yang besar dapat menunjukkan detail pergerakan mulut yang lebih menguatkan kesan ekspresi sedih.



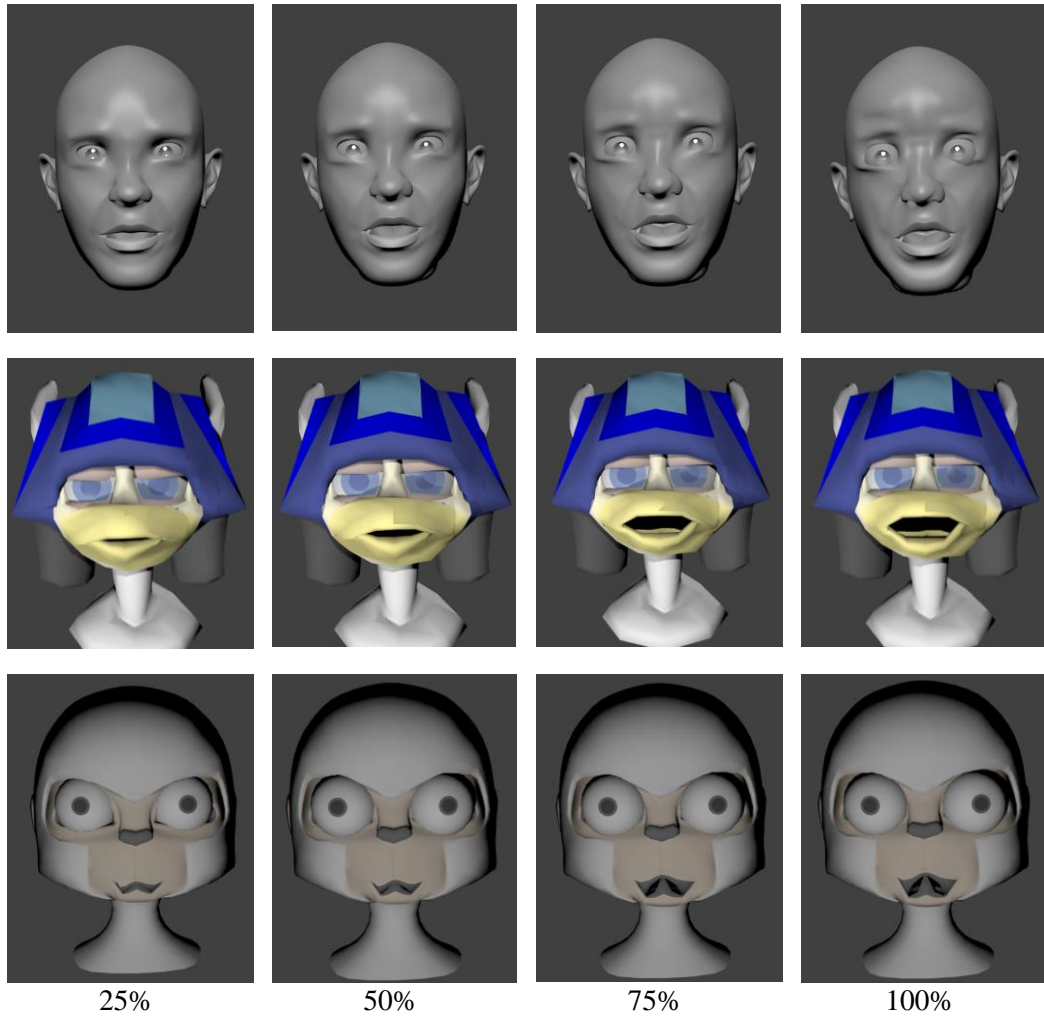
Gambar 3.53 Visualisasi sintesis ekspresi sedih dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%

Hasil sintesis ekspresi yang terakhir adalah sintesis ekspresi jijik yang disajikan berbasis *feature-point cluster* dan variasi tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%. Pada sintesis pose *frame-by-frame* hasil *retargeting* berbasis *feature-point cluster*, mayoritas gerakan mulut yang terbuka lebar dan gerakan seolah-olah menjauh menjadi ciri dari ekspresi ini. Hasil tersebut tampak ekspresif di karakter manusia, cuplikan gerakan yang terjadi dapat dilihat pada *frame* ke-3, 8 dan 16, Gambar 3.54.



Gambar 3.54 Hasil sintesis ekspresi jijik berbasis *feature-point cluster* di karakter wajah manusia pada frame ke-3, 8 dan 16.

Hasil variasi sintesis ekspresi jijik menunjukkan jelas adanya pergerakan mulut yang terbuka lebar dan gerakan menarik muka menjauh. Semua variasi yang dihasilkan menunjukkan kondisi serupa dengan tingkat perubahan bervariasi dari 25% sampai 100%, dari perubahan yang lembut ke perubahan yang paling ekstrim, Gambar 3.55.



Gambar 3.55 Visualisasi sintesis ekspresi jijik dengan tingkatan persentase emosi, yaitu 25%, 50%, 75% dan 100%

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 4

RETARGETING PADA ANIMASI WAJAH VIRTUAL 3D BERBASIS DATA MARKER MENGGUNAKAN RADIAL BASIS FUNCTION

4.1 Pendahuluan

Penggunaan citra wajah 2D sebagai sumber animasi dan melakukan proses pemetaan ulang pada wajah model 3D menggunakan transformasi ruang dapat dilakukan menggunakan metode interpolasi *radial basis function* atau RBF. Proses menangkap gerak wajah sumber dapat dilakukan dengan menggunakan satu kamera akan tetapi dapat tetap membangun ekspresi yang tepat dan emosi yang natural pada wajah model 3D.

Pada tahun 1970-an, metode RBF dikembangkan dan menjadi metode yang handal untuk membangun fungsi dan untuk memecahkan persamaan diferensial berdasarkan data yang tersebar (Hubbert et al., 2015). Empat rumus RBF yang paling umum adalah *Gaussian* (4.1), *Inverse Quadratic* (4.2) *Inverse Multiquadric* (4.3) dan *Multiquadric* (4.4). *Multiquadric* merupakan fungsi radial RBF yang paling populer dan digunakan dalam berbagai aplikasi (Chenoweth, 2012).

$$\phi(r, \varepsilon) = e^{-\varepsilon^2 r^2} \quad (4.1)$$

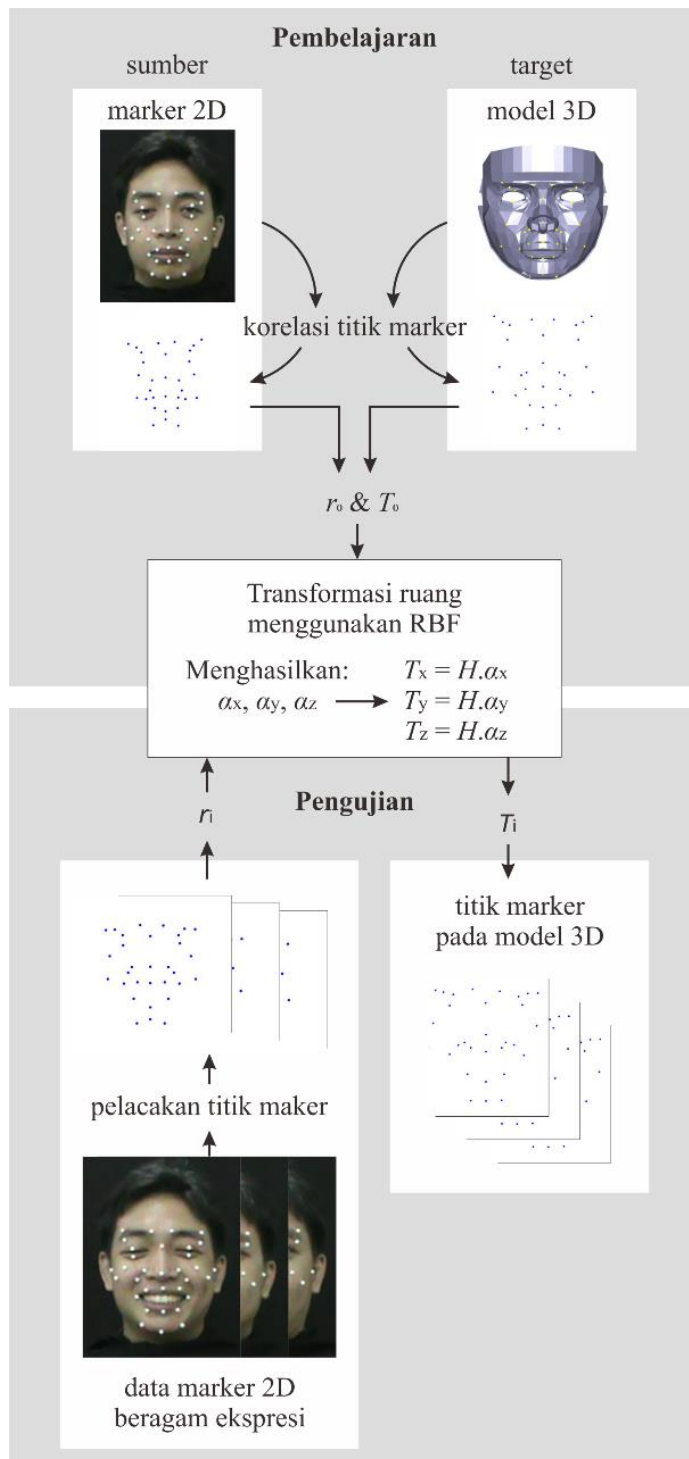
$$\phi(r, \varepsilon) = 1/(1 + \varepsilon^2 r^2) \quad (4.2)$$

$$\phi(r, \varepsilon) = 1/\sqrt{1 + \varepsilon^2 r^2} \quad (4.3)$$

$$\phi(r, \varepsilon) = \sqrt{1 + \varepsilon^2 r^2} \quad (4.4)$$

Proses transformasi dibagi menjadi dua tahap, yaitu pembelajaran dan pengujian. Pada tahap pembelajaran, titik *marker* pada wajah sumber dengan ekspresi netral disimpan dan dikorelasikan dengan titik fitur pada wajah model 3D yang juga berekspresi netral. Kemudian transformasi ruang RBF menghasilkan bobot tiap titik fitur pada koordinat (x, y, z). Pada tahap pengujian, berbagai ekspresi yang menampilkan emosi dari wajah sumber animasi ditangkap pergerakan titik *marker*-nya. Setelah semua dicatat, transformasi dihitung dengan menggunakan bobot yang telah diperoleh pada tahap pembelajaran sehingga lokasi

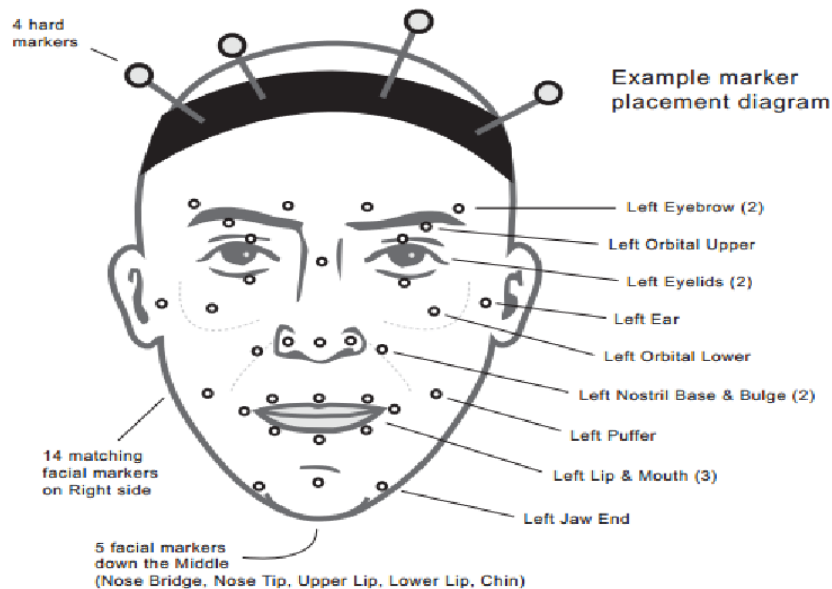
titik fitur pada wajah model 3D yang telah mengalami pergerakan dapat dipetakan ulang, Gambar 4.1 .



Gambar 4.1 Alur transformasi ruang RBF

4.2 Tahapan Eksperimentasi

Eksperimentasi diawali dengan pengambilan data video wajah manusia yang telah ditandai oleh *marker* sebanyak 33 buah. Peletakan posisi *marker* pada wajah mengacu sesuai skema yang dipakai oleh *OptiTrack* yaitu pada posisi titik *marker* acuan Gambar 4.2.

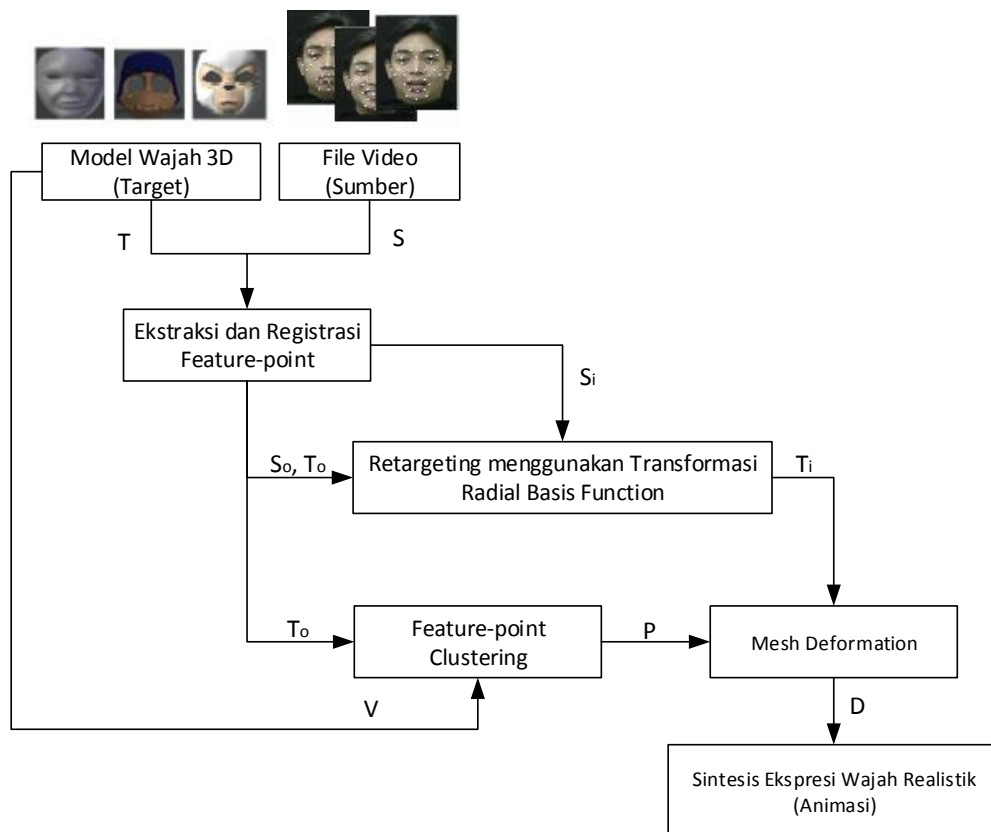


Gambar 4.2 Posisi peletakan 33 *marker* berdasarkan standar *OptiTrack*.
(sumber: <https://www.optitrack.com/products/expression/>)

Setelah setiap *marker* terpasang, kemudian dilakukan perekaman data ekspresi manusia yang terdiri dari ekspresi: senang(E_{happy}), sedih($E_{sadness}$), takut(E_{fear}), marah(E_{anger}), terkejut($E_{surprise}$) dan jijik($E_{disgust}$). Setiap ekspresi yang direkam dinyatakan sebagai sebuah data sumber(S) yang akan diproses sintesis ke target(T) model wajah 3D. Variasi model wajah 3D yang digunakan sebagai target sintesis ekspresi wajah realistik terdiri dari 3 buah model, yakni: manusia(T_{human}), angsa(T_{angsa}) dan anoman(T_{anoman}).

Data sumber(S) dan data target(T) menjadi bagian masukan dari penelitian ini, sehingga keduanya diproses pada tahap awal dengan terlebih dahulu melakukan ekstraksi dan registrasi *feature-point* yang saling berelasi antara data sumber(S) dan data target (T) yang akan menjadi kunci dalam melakukan proses penjejakan fitur dan *retargeting* perubahan yang terjadi ke model wajah 3D selaku target(T).

Penelitian ini secara lengkap berikut keterkaitan data *retargeting* dengan hasil perhitungan *feature-point clustering* untuk menghasilkan sintesis ekspresi wajah ke model 3D diawali dengan proses ekstraksi dan registrasi *feature-point* bagi data sumber(S) yang berupa berkas video berfungsi untuk melakukan ekstraksi *marker* dari berkas video, parameterisasi *marker* sebagai nilai *feature-point* sumber(S_o), dan melakukan penjejakan *marker* dengan mempertahankan koherensi parameter *marker* di setiap *frame*. Sedangkan bagi data target(T), berfungsi untuk penandaan posisi titik fitur gerak atau *feature-point* pada model wajah 3D(T_o) yang akan digunakan pada proses *feature-point clustering* dan *retargeting* menggunakan transformasi *radial basis function* yang akan menentukan visualisasi sintesis ekspresi wajah realistik melalui proses deformasi *mesh* pada wajah model 3D, Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Alur penelitian untuk menghasilkan sintesis ekspresi wajah realistik dengan salah satu tahapannya berupa *retargeting* menggunakan *radial basis function*.

4.3 Ekstraksi dan Registrasi *Feature-point*

Video hasil perekaman ekspresi wajah yang telah dipasang *marker* kemudian di ekstraksi menjadi himpunan *frame* (FM) yang memiliki dependensi terhadap waktu(t) dan memiliki elemen matrik *frame* (fm_t):

$$FM = \{fm_1, fm_2, fm_3, fm_4, \dots, fm_t\}, t \in \mathbb{R} \quad (4.5)$$

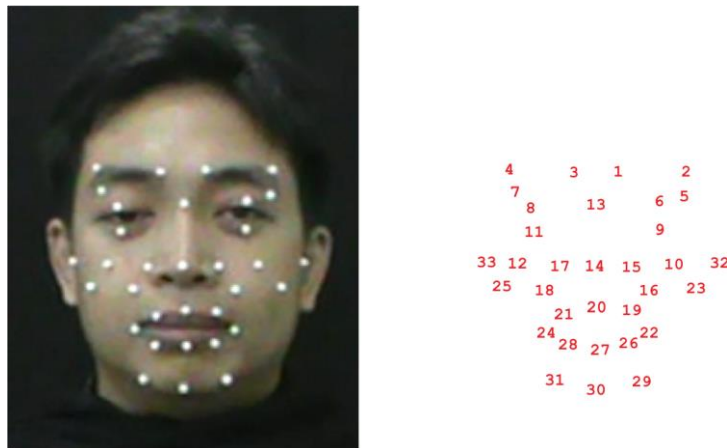
Setelah terbentuk himpunan *frame* (FM), kemudian masing-masing elemen *frame* (fm_t) dilakukan penjejakan posisi *marker* pada wajah dengan teknik *temporal coherence*. Prinsip utama pada proses ini adalah menjaga kesesuaian nomor label *marker* yang terdeteksi dari *frame* pertama(fm_1) sampai *frame* terakhir(fm_t) yang terikat pada urutan waktu tertentu.

Penjejakan diawali dengan terlebih dahulu melakukan pengambangan batas *frame* ke-1(fm_1) untuk memisahkan *marker* dari citra dengan terlebih dulu merubahnya menjadi matrik intensitas keabu-abuan(I) dan menjadikannya matrik biner(BW).

$$BW = \begin{cases} 1, & I > th \\ 0, & I < th \end{cases} \quad (4.6)$$

Pemberian label untuk setiap *marker* yang terpilih disesuaikan dengan Gambar 4.4, sehingga didapatkan himpunan *feature-point* untuk *frame* ke-1(F_1) sebanyak 33 elemen($n=33$):

$$F_1 = \{f_1, f_2, f_3, f_4, \dots, f_n \mid f \in \mathbb{R}^2\} \quad (4.7)$$



Gambar 4.4 Label penomoran *marker* untuk fitur titik hasil ekstraksi.

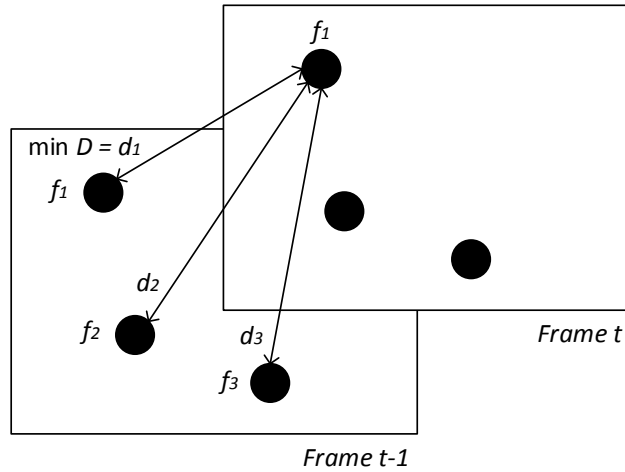
Acuan penjejukan untuk pembentukan himpunan *feature-point* ke- t (F_t) ditentukan dari himpunan *feature-point* sebelumnya (F_{t-1}), sehingga untuk himpunan *feature-point* pada *frame* ke-1 (F_1) akan menjadi acuan utama penjejukan *marker* di *frame* berikutnya ($t=2$) dan disimpan dalam nilai F_2 , begitu juga F_2 akan menjadi acuan penjejukan untuk pembentukan F_3 , begitu seterusnya sampai semua *frame* terproses.

Kesesuaian dan ketepatan *feature-point* yang dijejaki pada citra ditentukan dari nilai kemiripan antara himpunan *feature-point* ke- t (F_t) dengan himpunan *feature-point* sebelumnya (F_{t-1}). Setiap *feature-point* yang menjadi anggota F_t akan dihitung nilai jarak dengan seluruh elemen *feature-point* di F_{t-1} . Jadi untuk setiap *feature-point* (f_i) akan memiliki himpunan jarak (D) yang merupakan hasil perhitungan terhadap setiap *feature-point* di *frame* sebelumnya (f_{t-1}).

$$D = \{d_1, d_2, d_3, \dots, d_m\} \quad (4.8)$$

Dengan nilai d adalah nilai jarak euclidean *feature-point* ke- t (f_i) terhadap *feature-point* sebelumnya (f_{t-1}) dengan banyaknya elemen (m) sebanyak jumlah *feature-point*, yakni 33 buah.

Jika masing-masing *feature-point* ke- t (f_i) sudah memiliki himpunan jarak (D) terhadap *feature-point* sebelumnya (f_{t-1}), maka parameterisasi nomor *feature-point* ke- t dapat ditentukan dengan memilih parameter nomor *feature-point* sebelumnya (f_{t-1}) yang memiliki jarak minimum, $\min D$, terhadap *feature-point* ke- t (f_i). Pada Gambar 4.5, proses pemilihan *feature-point* di *frame* ke- t dilakukan dengan terlebih dahulu memilih salah satu *feature-point* di *frame* t yang akan dinomori lalu menghitung jaraknya terhadap *feature-point* ke-1 di *frame* $t-1$ sebagai nilai jarak d_1 , jarak terhadap *feature-point* ke-2 sebagai d_2 , dan jarak terhadap *feature-point* ke-3 sebagai d_3 . Setelah semua nilai d didapatkan, ternyata nilai d_1 merupakan nilai terminimum dari semua jarak yang dihitung ($\min D$), sehingga dipilahlah nomor parameter bagi *feature-point* yang terpilih di *frame* ke- t sebagai *feature-point* dengan nomor parameter 1.



Gambar 4.5 Pemilihan nomor parameter untuk *feature-point* nomor 1 pada *frame* ke-*t*

Setelah semua *marker* pada setiap *frame* terjejak dan sudah terparameter sebagai *feature-point*, maka didapati hasil himpunan gabungan *feature-point* dari setiap *frame* yang dinyatakan sebagai data sumber(*S*).

$$S = \{F_1, F_2, F_3, \dots, F_f\} \quad (4.9)$$

dengan elemen himpunan *feature-point*(*F*) sebanyak *frame*(*f*) yang ada pada data video selaku data sumber. Nilai matrik *S* kemudian akan diekstrak kembali menjadi dua buah matrik, yakni *S_o* dan *S_i* yang masing-masing berisi data matrik sumber(*S*) elemen pertama sebagai matrik *S_o* dan elemen kedua sampai sebanyak *frame*(*f*) sebagai matrik *S_i*.

$$S_o = F_1 \quad ; \quad S_i = \{F_2, F_3, F_4, \dots, F_f\} \quad (4.10)$$

Kedua nilai *S_o* dan *S_i* nantinya akan digunakan pada proses *retargeting* menggunakan transformasi *radial basis function*.

Selain matrik *S_o* dan *S_i*, pada proses ini juga menghasilkan keluaran matrik *T_o* yang berupa matrik posisi *feature-point* pada data target(*T*) yang telah ditentukan dan berkorelasi penomorannya dengan hasil parameterisasi matrik *feature-point* data sumber di *frame* ke-1 atau yang sudah diekstraksi menjadi matrik *S_o*.

$$T_o = \{tr_1, tr_2, tr_3, \dots, tr_n \mid tr \in \mathbb{R}^3\} \quad (4.11)$$

Pada proses *retargeting* menggunakan transformasi *radial basis function*, data yang digunakan sebagai masukan adalah data sumber pada posisi *frame* ke-1 (S_o), data target pada posisi tanpa ekspresi atau netral (T_o), dan data sumber dengan posisi pada *frame* ke-2 sampai selesai (S_i). Data matrik S_o dan T_o dipakai pada proses pembelajaran matrik transformasi, sedangkan data S_i dipakai sebagai data masukan untuk menghasilkan data *retargeting* yang berubah (T_i) berdasarkan perubahan yang terjadi pada data S_i .

Persamaan RBF yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \phi(\|x - x_i\|) \quad (4.12)$$

Nilai ϕ hanya tergantung pada jarak dari pusat dan dengan demikian disebut radial (4.13). Radial ini adalah jarak antara titik fitur pada citra wajah 2D.

$$\phi(\|xy_i - xy_j\|) = \sqrt{(\|xy_i - xy_j\|)^2 + r^2} \quad (4.13)$$

Persamaan (4.13) adalah RBF *Multiquadric*. Nilai xy adalah posisi titik *marker* pada koordinat 2D. Menggunakan teorema Pitagoras, jarak antar titik *marker* dapat diketahui. Nilai r ditentukan berdasarkan jarak terpendek dari semua titik *marker* pada wajah sumber animasi (4.14).

$$r = \min_{i \neq j} (\|xy_i - xy_j\|) \quad (4.14)$$

Nilai $\phi(\|xy_i - xy_j\|)$ digunakan untuk membangun matriks H . Lalu nilai bobot (α) untuk setiap koordinat (x, y, z) dari wajah model 3D diperoleh (4.15):

$$T_x = H \cdot \alpha_x, T_y = H \cdot \alpha_y, T_z = H \cdot \alpha_z \quad (4.15)$$

Jika diketahui $T_x = (t_1^x, t_2^x, t_3^x, \dots, t_n^x)$, $T_y = (t_1^y, t_2^y, t_3^y, \dots, t_n^y)$ dan $T_z = (t_1^z, t_2^z, t_3^z, \dots, t_n^z)$, maka dengan menerapkan eliminasi Gauss (*back substitution*) dari (4.15) diperoleh:

$$\alpha_x = H^{-1} \cdot T_x, \alpha_y = H^{-1} \cdot T_y, \alpha_z = H^{-1} \cdot T_z \quad (4.16)$$

Setelah matrik H dan bobot masing-masing koordinat (x, y, z) (4.16) diperoleh, pemetaan ulang titik fitur dapat dihitung dengan cepat untuk setiap posisi titik *marker* berdasar gerakan wajah sumber animasi menggunakan Persamaan 4.17.

$$F(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^x \cdot \phi(\|xy - xy_i\|),$$

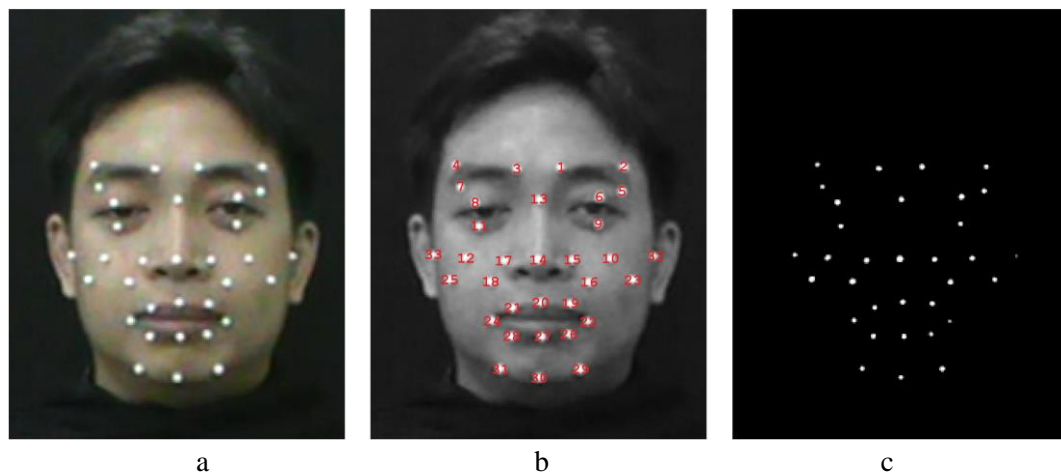
$$F(y) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^y \cdot \phi(\|xy - xy_i\|),$$

$$F(z) = \sum_{i=1}^n \alpha_i^z \cdot \phi(\|xy - xy_i\|) \quad (4.17)$$

Pada tahap pengujian, citra 2D yang berurutan diekstrak untuk menemukan lokasi titik *marker* pada wajah sumber. Setelah diperoleh nilai jarak radial kemudian nilai bobot (α) serta matrik H (ϕ) dari proses pembelajaran, transformasi ruang RBF akan mengestimasi lokasi (x, y, z) dari titik fitur wajah model 3D. Sehingga wajah model 3D masih memiliki kedalaman dan mempertahankan bentuk 3D-nya.

4.4 Pelatihan dan Analisa

Pengujian transformasi ruang RBF untuk animasi wajah berdasarkan titik *marker* dari sumber 2D ke model wajah 3D akan disajikan sebagai berikut: Pada tahap pembelajaran, citra wajah manusia berekspresi netral yang telah diberi marker (Gambar 4.6a) diekstrak (Gambar 4.6b) kemudian untuk diketahui formasi titik *marker* (Gambar 4.6c) yang membangun ekspresi netral tersebut.

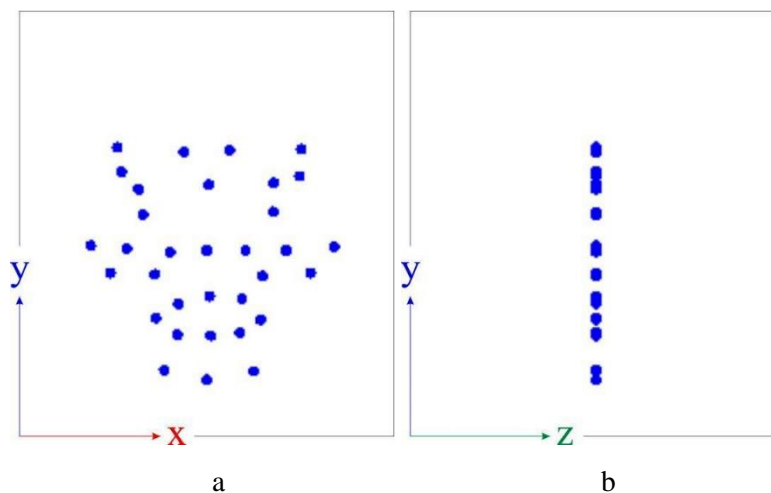


Gambar 4.6 Citra wajah manusia berekspresi netral dengan titik *marker*

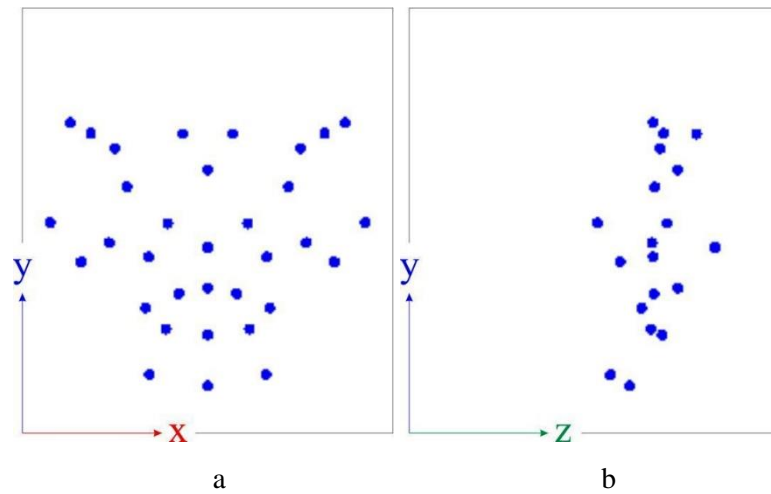
Pada Gambar 4.7a, ditunjukkan formasi titik *marker* dari wajah sumber dimana formasi tersebut memberikan informasi lokasi titik *marker* pada koordinat (x, y) tanpa ada kedalaman atau koordinat z (Gambar 4.7b). Pada Gambar 4.8a, ditunjukkan formasi titik fitur dari wajah target dimana formasi tersebut

memberikan informasi lokasi titik fitur pada koordinat (x, y, z) . Wajah target yang merupakan wajah model 3D memiliki kedalaman, sehingga posisi titik fitur memiliki kedalaman jika dilihat dari samping (Gambar 4.8b).

Setelah titik marker dari citra wajah 2D dan titik fitur wajah model 3D diketahui, maka dibangun relasi antar titik-titik tersebut. Setelah melalui tahap pembelajaran, maka diperoleh nilai bobot untuk setiap lokasi titik fitur pada wajah model 3D. Kemudian dilakukan pengujian terhadap wajah model 3D. Pengujian dilakukan dengan memasukkan data titik marker dari citra wajah yang memiliki ekspresi yang berbeda dengan citra pada tahap pembelajaran. Titik *marker* pada citra wajah tersebut dilacak ulang gambar untuk kemudian mengetahui lokasi koordinat titik marker yang baru. Selanjutnya, transformasi ruang RBF akan mengestimasi koordinat (x, y, z) dari titik fitur untuk wajah model 3D.

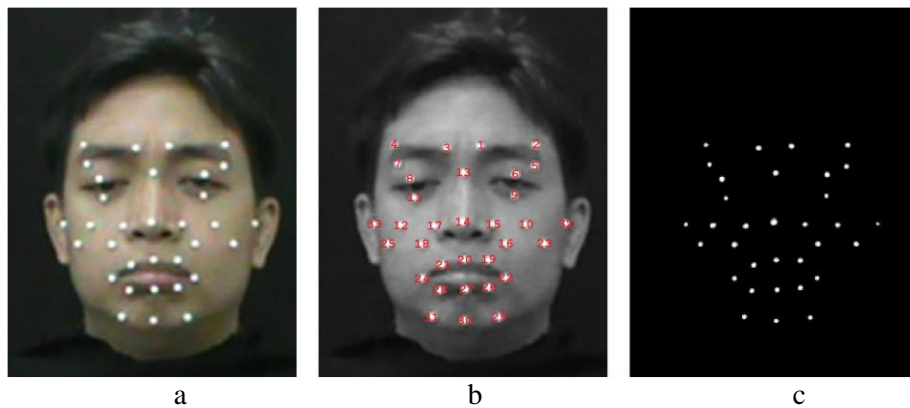


Gambar 4.7 Titik *marker* dari citra wajah 2D pada ekspresi netral

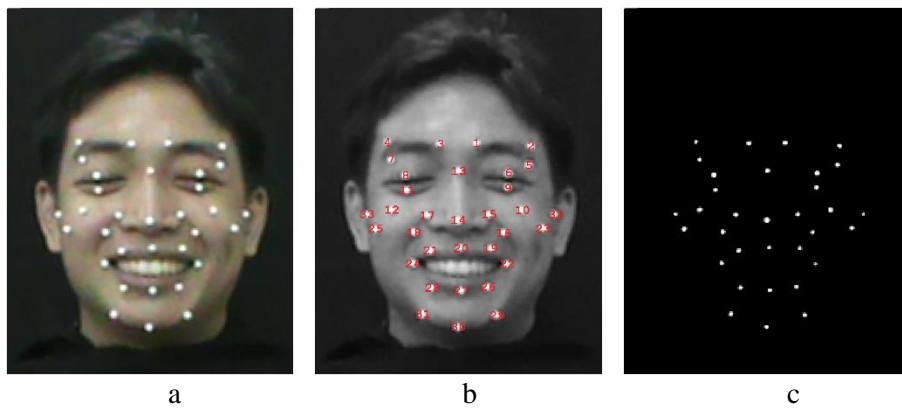


Gambar 4.8 Titik fitur dari wajah model 3D pada ekspresi netral

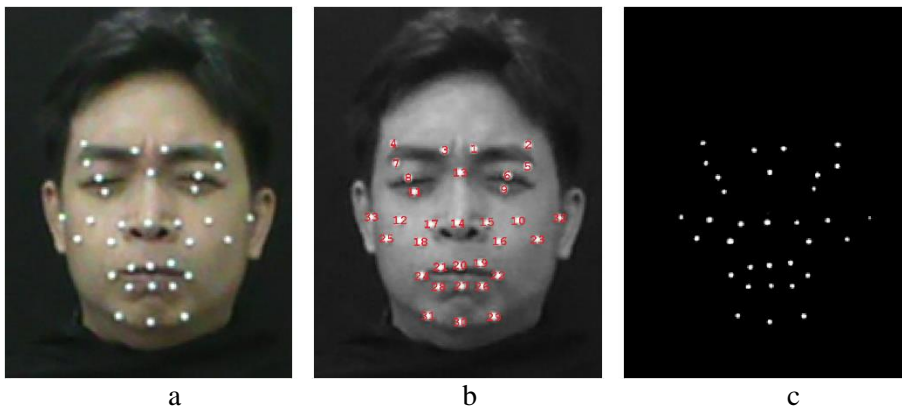
Sebagai bahan uji coba, digunakan data hasil ekstraksi enam citra wajah dengan ekspresi yang menunjukkan enam emosi dasar manusia; sedih (Gambar 4.9), senang (Gambar 4.10), marah (Gambar 4.11), jijik (Gambar 4.12), takut (Gambar 4.13), terkejut (Gambar 4.14). Masing-masing gambar terdapat 3 bagian, yaitu: a) merupakan citra wajah dengan titik *marker*; b) merupakan proses ekstraksi yang terjadi; dan c) merupakan formasi titik *marker* hasil ekstraksi citra wajah.



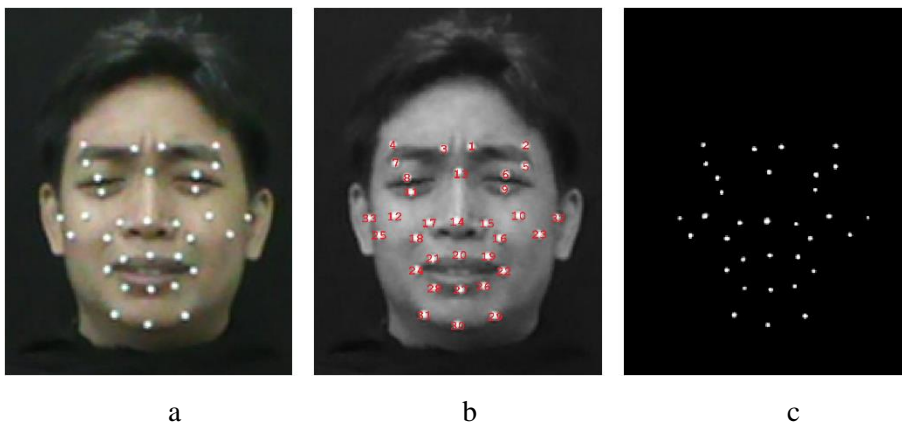
Gambar 4.9 Citra wajah manusia berekspresi sedih dengan titik *marker*



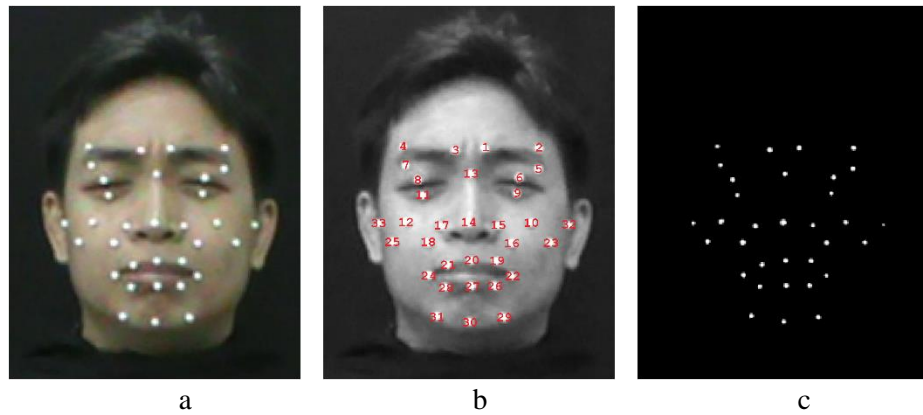
Gambar 4.10 Citra wajah manusia berekspresi senang dengan titik *marker*



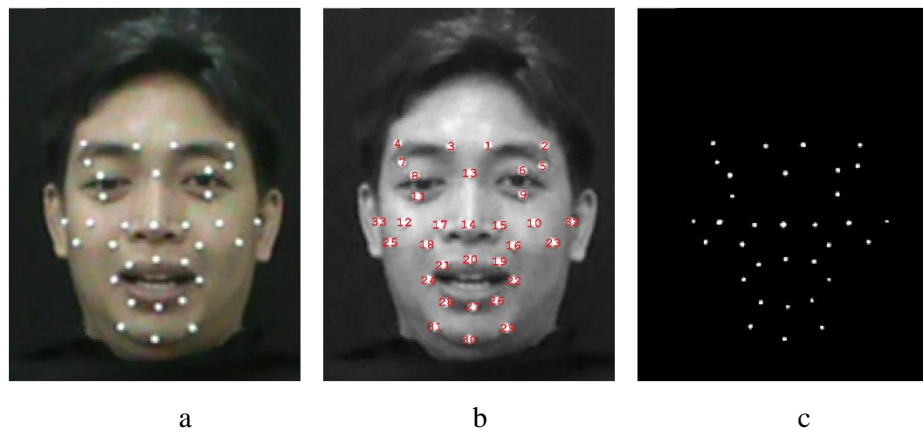
Gambar 4.11 Citra wajah manusia berekspresi marah dengan titik *marker*



Gambar 4.12 Citra wajah manusia berekspresi jijik dengan titik *marker*



Gambar 4.13 Citra wajah manusia berekspresi takut dengan titik *marker*



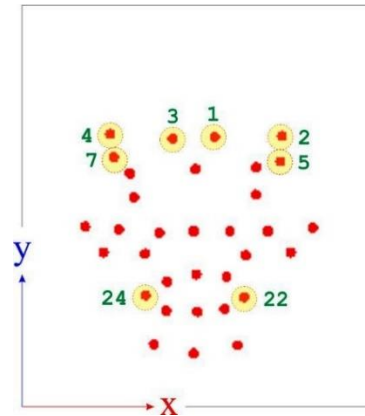
Gambar 4.14 Citra wajah manusia berekspresi terkejut dengan titik *marker*

4.5 Pengujian dan Validasi

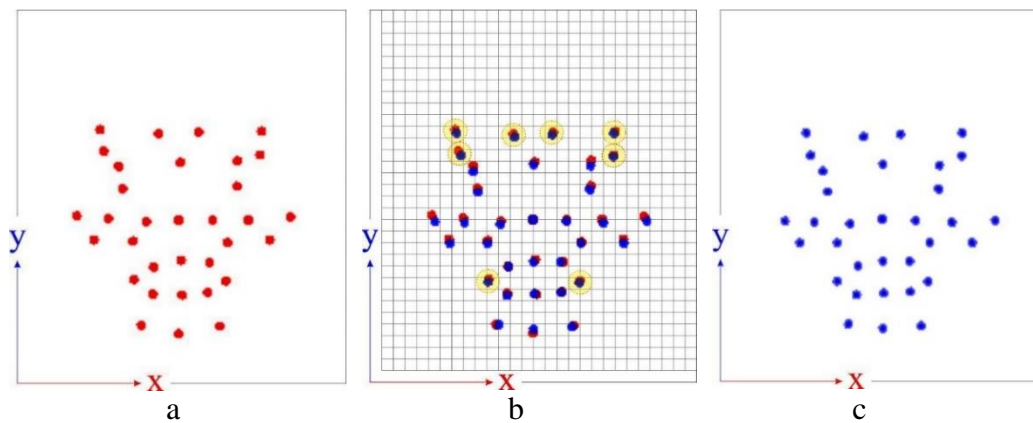
4.5.1 Ekspresi Sedih

Setelah lokasi titik *marker* diketahui, maka transformasi ruang RBF akan melakukan pemetaan ulang lokasi titik fitur yang baru sesuai dengan citra wajah masukan. Berdasarkan Lucey et al. ekspresi sedih memiliki kriteria AU: kombinasi antara alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) yang diturunkan dan ujung bibir (22, 24) yang ditarik ke bawah (Gambar 4.15) (Lucey et al., 2010). Pada pergeseran titik marker citra wajah 2D (Gambar 4.16b) ditunjukkan dengan titik marker pada alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) yang diturunkan dan ujung bibir (22, 24) yang ditarik ke bawah. Demikian pula pada hasil transformasi ruang RBF (Gambar 4.17b) terjadi pergeseran titik fitur pada alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) yang diturunkan dan ujung bibir (22, 24) yang ditarik ke bawah.

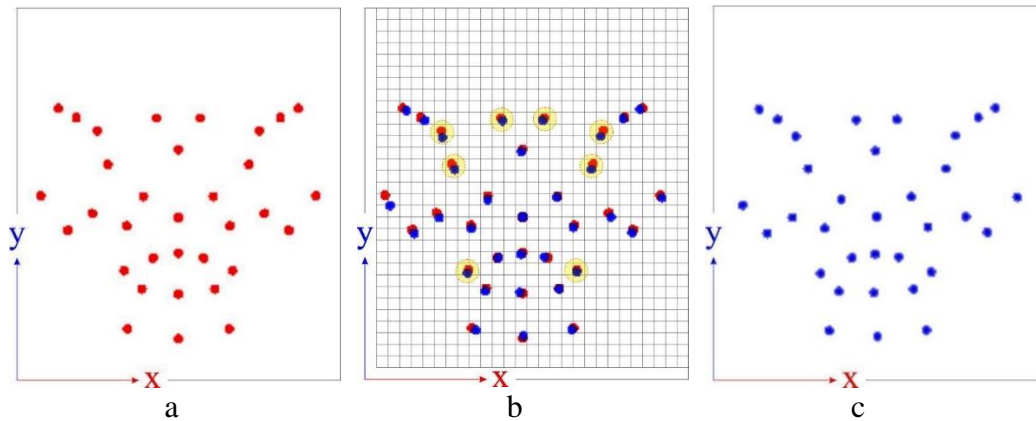
Kedua gambar berikut (Gambar 4.16 dan Gambar 4.17) adalah proses yang terjadi dari perhitungan transformasi ruang RBF pada ekspresi sedih. Gambar 4.16 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik marker citra wajah 2D dari ekspresi netral (gambar a) ke ekspresi sedih (gambar c). Gambar 4.17 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik fitur wajah model 3D dari ekspresi netral (gambar a) ke titik hasil pemetaan transformasi ruang RBF (gambar c).



Gambar 4.15 Posisi titik *marker* yang bergeser pada ekspresi sedih



Gambar 4.16 Pergeseran titik *marker* pada ekspresi wajah manusia sedih

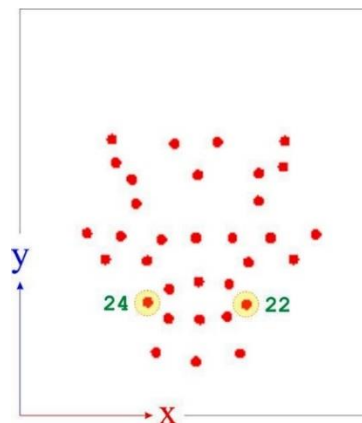


Gambar 4.17 Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model sedih

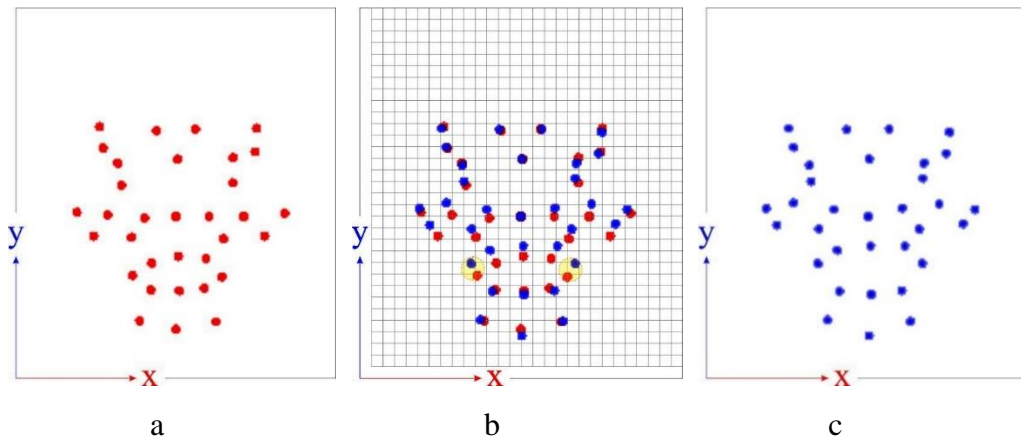
4.5.2 Ekspresi Senang

Ekspresi senang memiliki kriteria AU: sudut ujung bibir (22, 24) yang ditarik melebar dan naik (Gambar 4.18). Pada pergeseran titik marker citra wajah 2D (Gambar 4.19b) ditunjukkan dengan titik marker pada ujung bibir (22, 24) yang melebar dan naik. Demikian pula pada hasil transformasi ruang RBF (Gambar 4.20b) terjadi pergeseran titik fitur pada ujung bibir (22, 24) yang melebar dan naik.

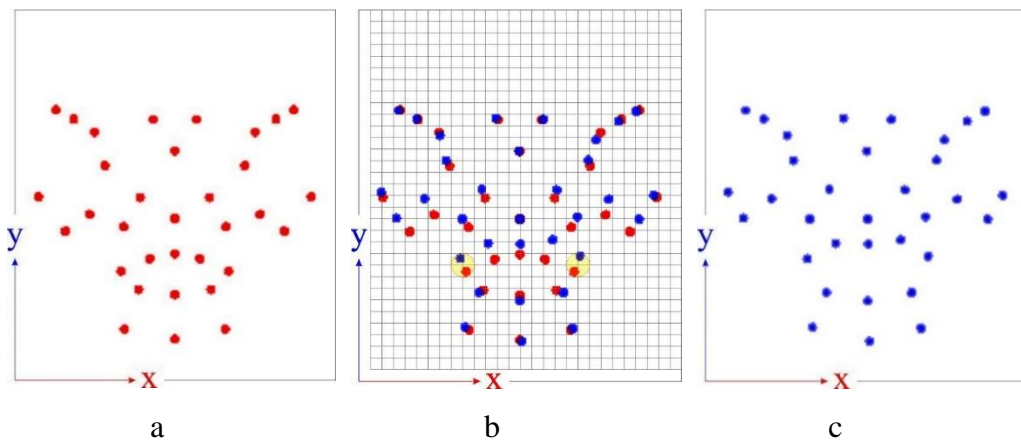
Kedua gambar berikut (Gambar 4.19 dan Gambar 4.20) adalah proses yang terjadi dari perhitungan transformasi ruang RBF pada ekspresi senang. Gambar 4.19 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik marker citra wajah 2D dari ekspresi netral (gambar a) ke ekspresi senang (gambar c). Gambar 4.20 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik fitur wajah model 3D dari ekspresi netral (gambar a) ke titik hasil pemetaan transformasi ruang RBF (gambar c).



Gambar 4.18 Posisi titik *marker* yang bergeser pada ekspresi senang



Gambar 4.19 Pergeseran titik *marker* pada ekspresi wajah manusia senang



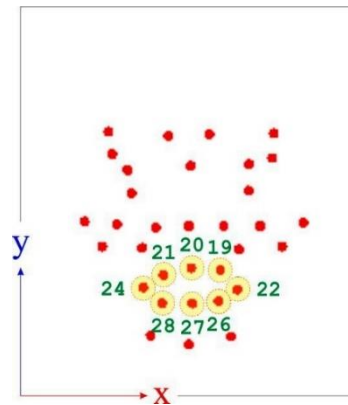
Gambar 4.20 Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model senang

4.5.3 Ekspresi Marah

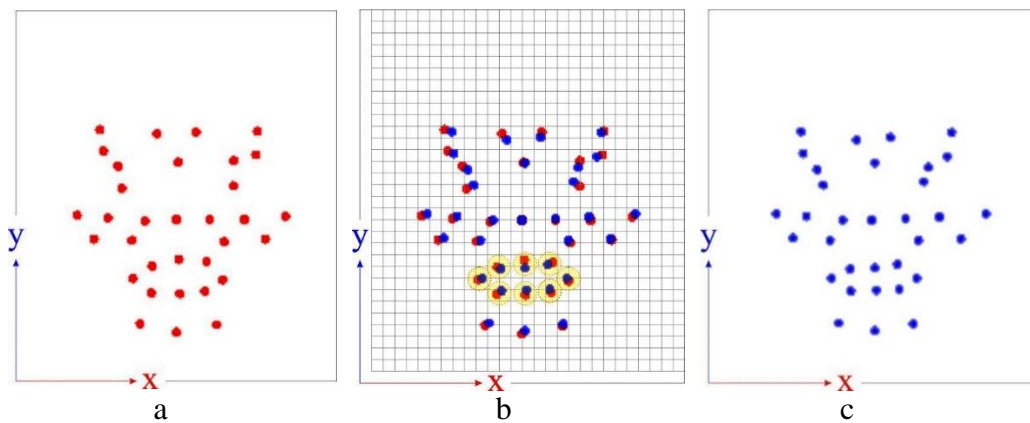
Ekspresi marah memiliki kriteria AU: bibir (19, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28) yang merapat dan ditarik ke dalam (Gambar 4.21). Pada pergeseran titik marker citra wajah 2D (Gambar 4.22b) ditunjukkan dengan titik marker pada lingkaran bibir (19, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28) yang merapat dan mengecil. Demikian pula pada hasil transformasi ruang RBF (Gambar 4.23b) terjadi pergeseran titik fitur pada lingkaran bibir (19, 20, 21, 22, 24, 26, 27, 28) yang merapat dan mengecil.

Kedua gambar berikut (Gambar 4.22 dan Gambar 4.23) adalah proses yang terjadi dari perhitungan transformasi ruang RBF pada ekspresi marah. Gambar 4.22

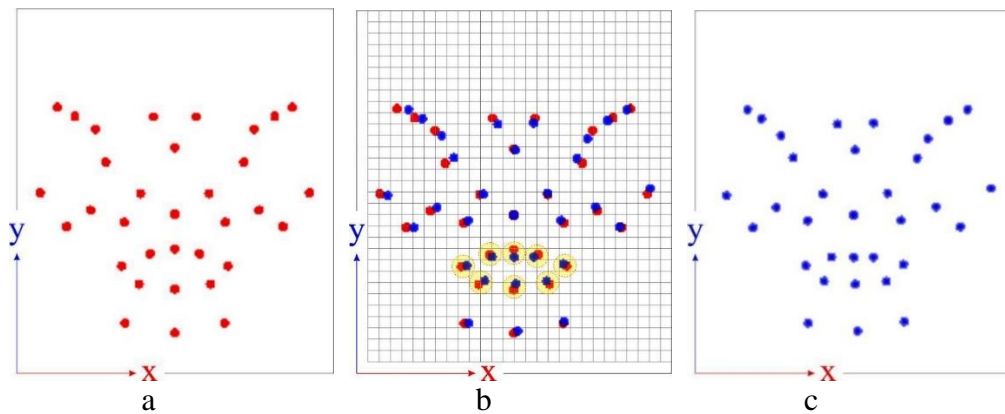
menunjukkan pergeseran (gambar b) titik marker citra wajah 2D dari ekspresi netral (gambar a) ke ekspresi marah (gambar c). Gambar 4.23 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik fitur wajah model 3D dari ekspresi netral (gambar a) ke titik hasil pemetaan transformasi ruang RBF (gambar c).



Gambar 4.21 Posisi titik *marker* yang bergeser pada ekspresi marah



Gambar 4.22 Pergeseran titik *marker* pada ekspresi wajah manusia marah

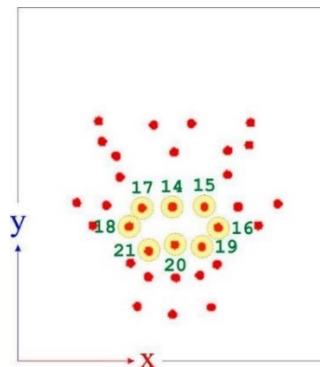


Gambar 4.23 Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model marah

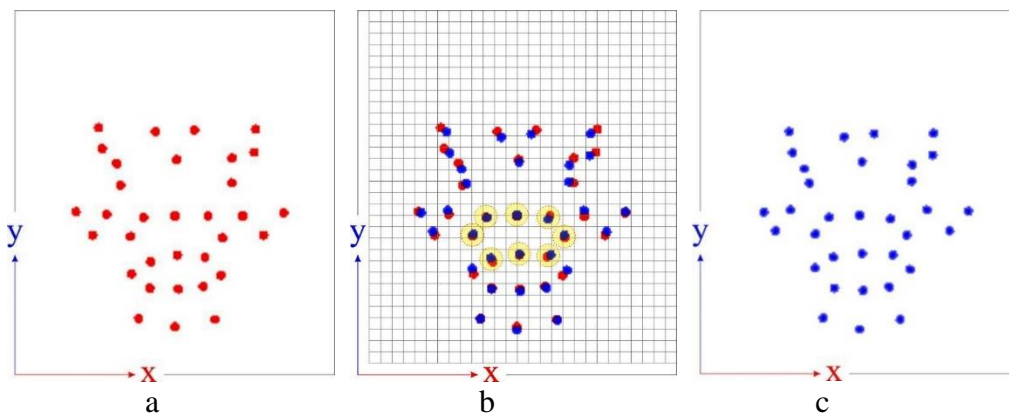
4.5.4 Ekspresi Jijik

Ekspresi jijik memiliki kriteria AU: hidung (14, 15, 16, 17, 18) mengecil dan bibir atas (19, 20, 21) terangkat (Gambar 4.24). Pada pergeseran titik marker citra wajah 2D (Gambar 4.25b) ditunjukkan dengan titik *marker* pada area hidung (14, 15, 16, 17, 18) yang merapat dan bibir atas (19, 20, 21) yang dinaikkan. Demikian pula pada hasil transformasi ruang RBF (Gambar 4.26b) terjadi pergeseran titik fitur pada area hidung (14, 15, 16, 17, 18) yang merapat dan bibir atas (19, 20, 21) yang dinaikkan.

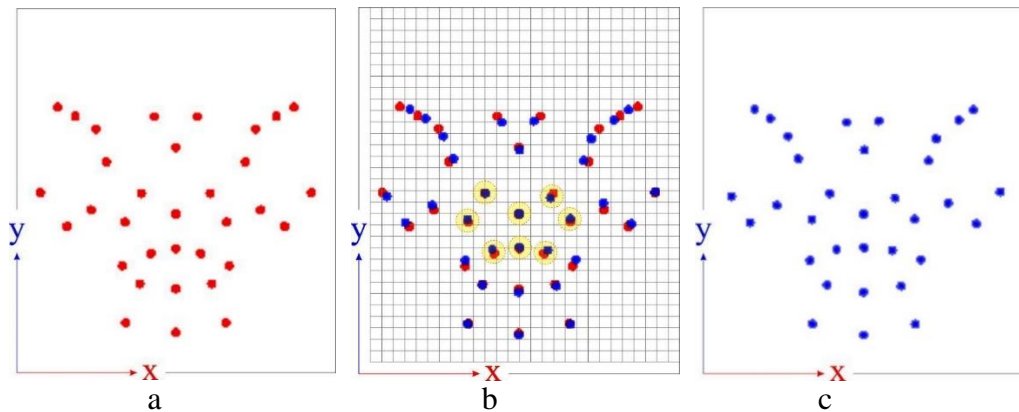
Kedua gambar berikut (Gambar 4.25 dan Gambar 4.26) adalah proses yang terjadi dari perhitungan transformasi ruang RBF pada ekspresi jijik. Gambar 4.25 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik marker citra wajah 2D dari ekspresi netral (gambar a) ke ekspresi jijik (gambar c). Gambar 4.26 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik fitur wajah model 3D dari ekspresi netral (gambar a) ke titik hasil pemetaan transformasi ruang RBF (gambar c).



Gambar 4.24 Posisi titik *marker* yang bergeser pada ekspresi jijik



Gambar 4.25 Pergeseran titik *marker* pada ekspresi wajah manusia jijik

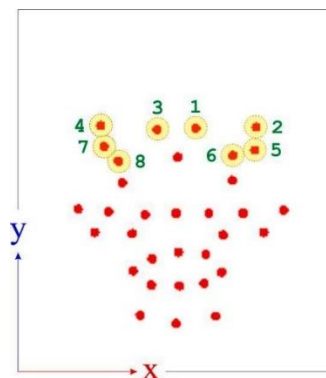


Gambar 4.26 Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model jijik

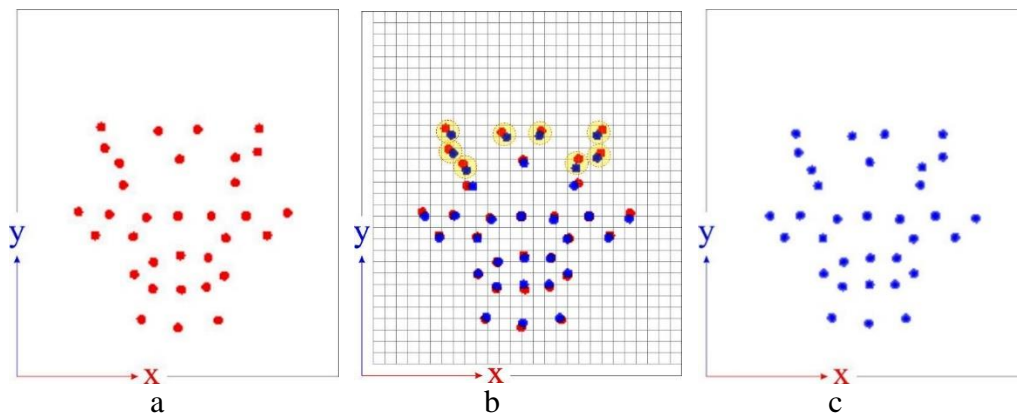
4.5.5 Ekspresi Takut

Ekspresi takut memiliki kriteria AU: alis (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) yang berkumpul dan diturunkan (Gambar 4.27). Pada pergeseran titik marker citra wajah 2D (Gambar 4.28b) ditunjukkan dengan titik marker pada alis bagian dalam (6, 8) yang merapat dan alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) yang merendah. Demikian pula pada hasil transformasi ruang RBF (Gambar 4.29b) terjadi pergeseran titik fitur pada alis bagian dalam (6, 8) yang merapat dan alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) yang merendah.

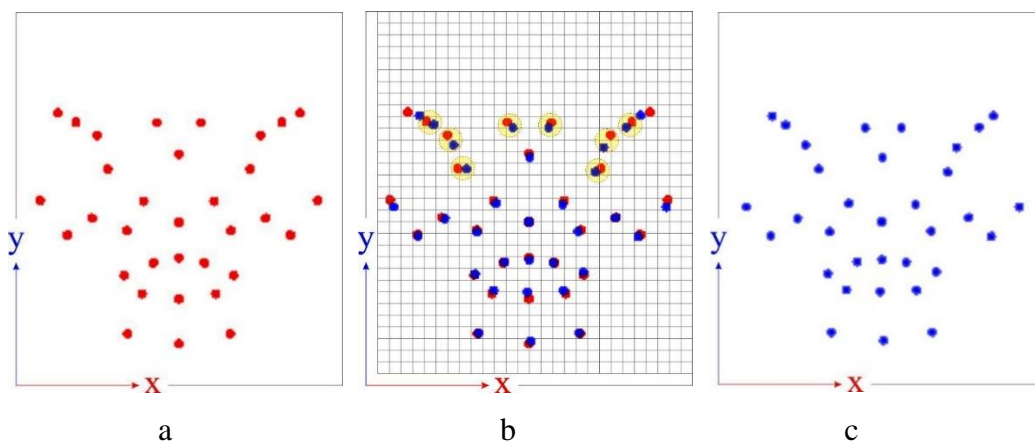
Kedua gambar berikut (Gambar 4.28 dan Gambar 4.29) adalah proses yang terjadi dari perhitungan transformasi ruang RBF pada ekspresi takut. Gambar 4.28 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik marker citra wajah 2D dari ekspresi netral (gambar a) ke ekspresi takut (gambar c). Gambar 4.29 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik fitur wajah model 3D dari ekspresi netral (gambar a) ke titik hasil pemetaan transformasi ruang RBF (gambar c).



Gambar 4.27 Posisi titik *marker* yang bergeser pada ekspresi takut



Gambar 4.28 Pergeseran titik *marker* pada ekspresi wajah manusia takut



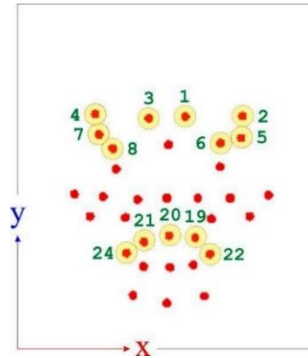
Gambar 4.29 Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model takut

4.5.6 Ekspresi Terkejut

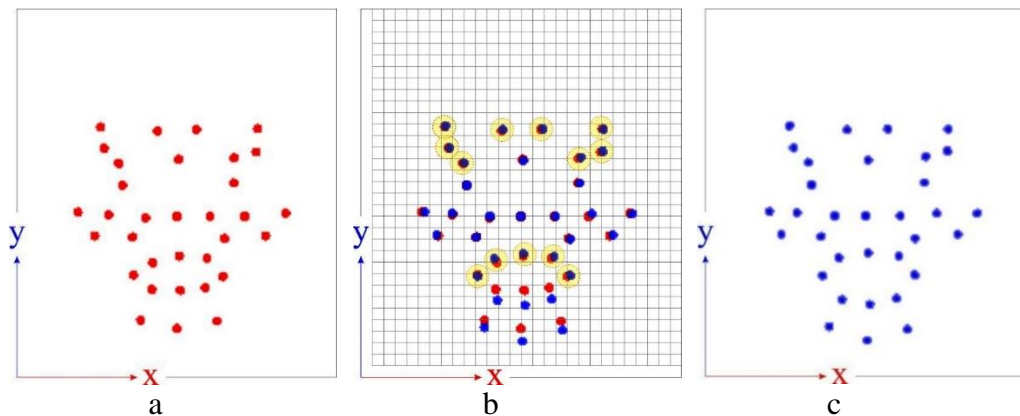
Ekspresi terkejut memiliki kriteria AU: alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) yang terangkat dan bibir (19, 20, 21, 22, 24) atas yang naik dan melebar (Gambar 4.30). Pada pergeseran titik marker citra wajah 2D (Gambar 4.31b) ditunjukkan dengan titik marker pada alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) dan alis bagian dalam (6, 8) yang naik serta bibir atas (19, 20, 21, 22, 24) yang naik dan melebar. Demikian pula pada hasil transformasi ruang RBF (Gambar 4.32b) terjadi pergeseran titik fitur pada alis (1, 2, 3, 4, 5, 7) dan alis bagian dalam (6, 8) yang naik serta bibir atas (19, 20, 21, 22, 24) yang naik dan melebar.

Kedua gambar berikut (Gambar 4.31 dan Gambar 4.32) adalah proses yang terjadi dari perhitungan transformasi ruang RBF pada ekspresi terkejut. Gambar

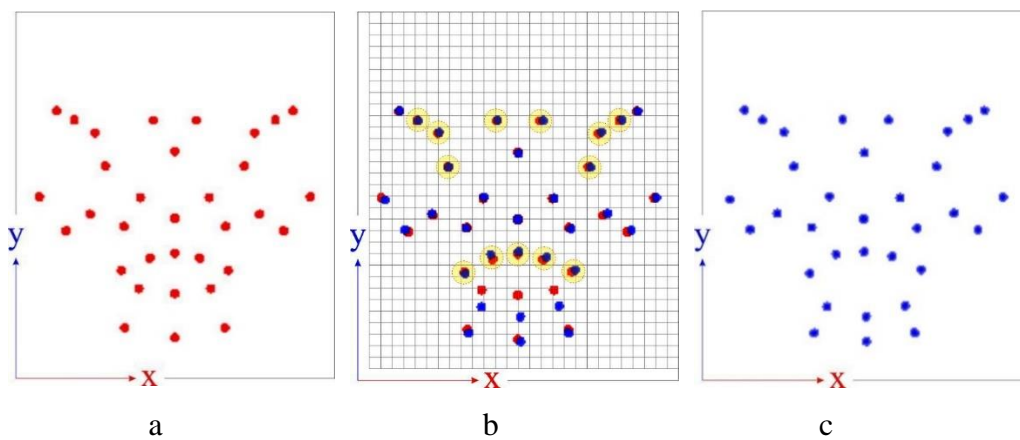
4.31 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik marker citra wajah 2D dari ekspresi netral (gambar a) ke ekspresi terkejut (gambar c). Gambar 4.32 menunjukkan pergeseran (gambar b) titik fitur wajah model 3D dari ekspresi netral (gambar a) ke titik hasil pemetaan transformasi ruang RBF (gambar c).



Gambar 4.30 Posisi titik *marker* yang bergeser pada ekspresi terkejut



Gambar 4.31 Pergeseran titik *marker* pada ekspresi wajah manusia terkejut



Gambar 4.32 Pergeseran titik fitur pada ekspresi wajah model terkejut

4.6 Kesimpulan Proses *Retargeting*

Berdasarkan hasil evaluasi pada enam ekspresi dasar yang digunakan pada tahap pengujian, yaitu: sedih, senang, marah, takut, jijik dan terkejut, transformasi ruang RBF dapat memetakan ulang titik fitur pada wajah model 3D sesuai dengan pergerakan titik *marker* pada citra wajah 2D yang menjadi wajah sumber animasi. Transformasi ruang RBF dapat mengatasi perbedaan bentuk/ morfologi wajah sumber animasi dengan wajah target animasi. Hal ini ditunjukkan dengan posisi titik *marker* pada citra wajah yang tidak simetris ternyata tidak merusak pemetaan ulang titik fitur pada wajah model 3D.

Keluaran dari proses implementasi ini masih berupa 33 titik fitur pada wajah model 3D sehingga masih diperlukan tahap *skinning-deformation* atau pembangunan permukaan wajah karakter animasi agar dapat memvisualisasikan terjadinya perubahan ekspresi.

4.7 Eksperimentasi Deformasi Linier Pada Model Wajah Virtual 3D Untuk Sintesis Ekspresi Wajah Realistik Berbasis *Feature-point Cluster* Menggunakan *Radial Basis Function*

Visualisasi perubahan wajah model 3D secara sekuensial untuk menggambarkan terjadinya sintesis ekspresi wajah realistik yang berbasis *feature-point cluster* menggunakan *radial basis function* dapat dibuat dengan skema eksperimentasi deformasi linier. Pada tahap awal yaitu citra yang digunakan sebagai sumber 2D *marker* akan melalui proses *face marker extraction* berdasarkan titik fitur yang ditanam pada wajah seorang aktor. Dari proses tersebut data yang diperoleh berupa matrix $[33 \times 2]$ koordinat dua dimensi yaitu koordinat xy. Langkah berikutnya adalah data koordinat akan ditransformasikan posisinya sesuai perubahan marker dua dimensi yaitu melalui proses *retargeting*. Hasilnya kemudian akan diperoleh data tiga dimensi berupa koordinat kartesian xyz yang merupakan data terjadinya sebuah perubahan akibat adanya perubahan posisi titik acuan gerak atau *rigging*.

Perhitungan deformasi dibentuk dari perhitungan bobot masing-masing titik atau vertek pembentuk model terhadap perubahan yang terjadi pada centroid

selaku pusat gerak wajah yang dihasilkan dari *retargeting radial basis function*. Perhitungannya secara linier dapat dijabarkan dengan Persamaan 4.18.

$$V_i = V_0 + WD \quad (4.18)$$

Dengan nilai V_i adalah vertek baru yang didapatkan dari perubahan vertek lama V_0 akibat adanya perubahan gerak pusat gerak atau *centroid* di area gerak dengan besaran perubahannya $W*D$, yaitu bobot perubahan W berdasarkan posisi vertek terhadap pusat gerak yang dipengaruhi sebesar nilai selisih pergerakan D .

Besaran nilai bobot dalam satu buah cluster area gerak didefinisikan dengan persamaan:

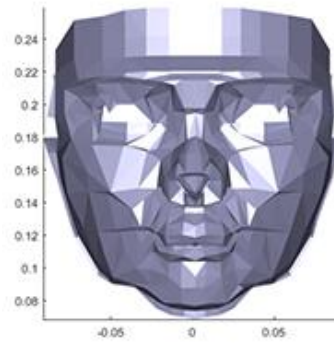
$$W_i = 1 - \frac{d_i}{d_{maksimum}} \quad (4.19)$$

Dimana nilai bobot W sebuah titik ditentukan oleh jarak posisi titik tersebut d terhadap jarak posisi titik terjauh $d_{maksimum}$ dari anggota cluster tersebut. Sehingga jika ditemui titik anggota tersebut tepat berada di titik *centroid*, maka akan memiliki nilai bobot maksimal, begitu pula jika titik anggota berada di titik terjauh akan memiliki bobot pergerakan yang minimum atau tidak terpengaruh perubahan yg terjadi.

Setelah pengolahan bobot dilakukan menggunakan data jarak keanggotaan terhadap *centroid*, maka didapat nilai besaran perubahan terhadap sumbu kartesian baru melalui perhitungan deformasi untuk setiap perubahan *centroid*. Pada Gambar 4.33 dan Gambar 4.34 adalah contoh hasil visualisasi dari perhitungan deformasi linier pada ekspresi senang dan ekspresi sedih. Gambar 4.33 menunjukkan visualisasi citra wajah 3 dimensi dengan 3324 titik vertek pada ekspresi senang, bagian a. Pada bagian b menunjukkan visualisasi citra wajah 3 dimensi dengan *mesh low*-poligonal ekspresi senang. Sedangkan Gambar 4.34 adalah visualisasi ekspresi sedih.



a

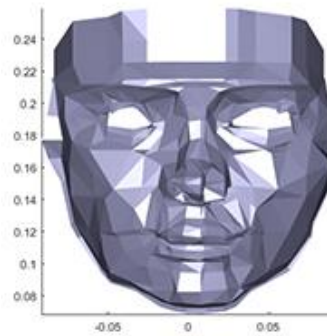


B

Gambar 4.33 Hasil visualisasi ekspresi senang



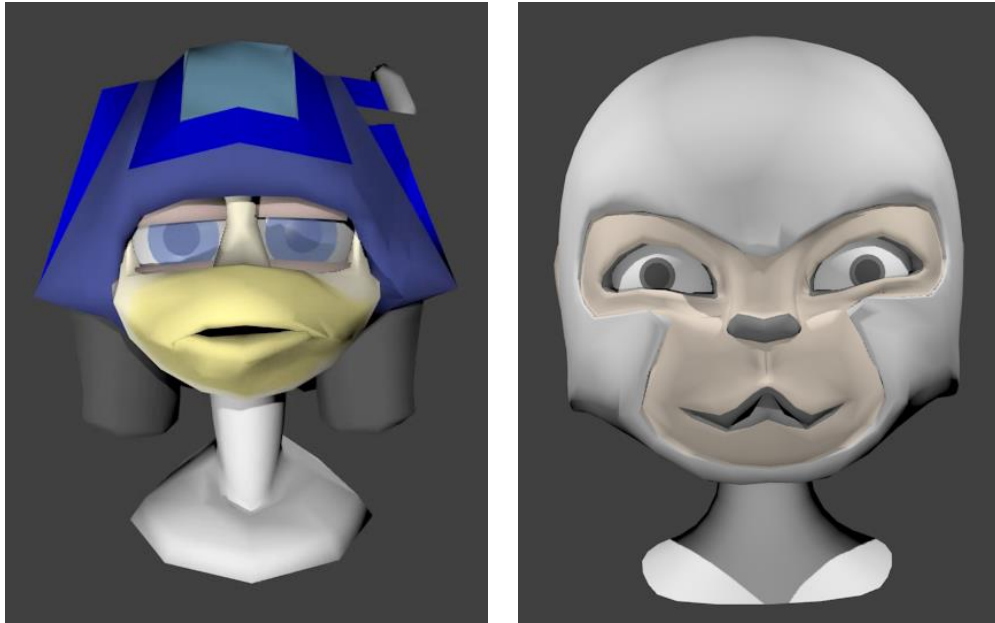
a.



b.

Gambar 4.34 Hasil visualisasi ekspresi sedih.

Jika selisih pergerakan secara temporer tercatat dan dilakukan proses penghalusan deformasi berbantuan perangkat lunak *blender* selaku mesin pembangkit visual, maka data selisih perubahan tersebut jika diterapkan pada model wajah 3D lainnya dapat ditunjukkan pada Gambar 4.35.

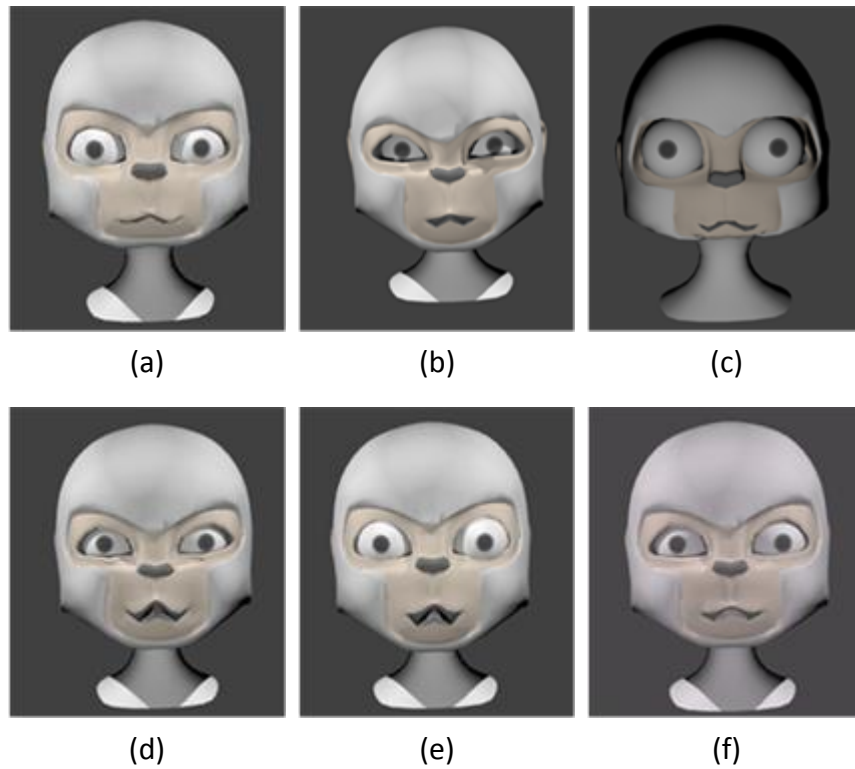


Gambar 4.35 Contoh penerapan perubahan titik fitur penanda akibat pergerakan pada model 3D selain manusia

4.8 Evaluasi Hasil Sintesis Ekspresi Wajah ke Karakter 3D

Eksperimentasi kali ini merupakan evaluasi kerangka kerja sistem sintesis ekspresi wajah 3D dengan memaparkan hasil kuisisioner persepsi visual dari sisi penonton untuk menilai hasil proses transfer ekspresi emosi dari manusia ke karakter animasi 3D. Keluaran dari hasil eksperimentasi ini diharapkan mampu menyumbangkan sebuah evaluasi hasil implementasi sintesis ekspresi wajah realistik 3D yang telah teruji kualitas visualnya.

Evaluasi ini dilakukan setelah semua syarat pembentukan ekspresi sudah memenuhi teori FACS. Penyajian hasil perubahan bentuk wajah ke masing-masing ekspresi dapat dilihat pada Gambar 4.36. Keenam ekspresi tersebut kemudian ditayangkan dalam bentuk kuisisioner tertulis dalam penyajian gambar statis dan elektronik dalam bentuk penayangan video. Responden sejumlah 33 orang sudah menyaksikan hasil implementasi tersebut sekaligus mengisi kuisisioner yang diberikan dengan perulangan 10 kali untuk meminimalkan terjadinya kesalahan persepsi visual.



Gambar 4.36. Visualisasi hasil transfer ekspresi ke model wajah 3D: a) Jijik; b) Marah; c) Takut; d) Senang; e) Terkejut; f) Sedih.

Hasil yang didapatkan secara umum menunjukkan bahwa dari keenam ekspresi tersebut, ekspresi terkejut memiliki persentasi paling tinggi mudah dikenali, yaitu: 89,32%. Ekspresi senang: 84,63 %, ekspresi sedih: 77,32%, ekspresi marah: 76,64%, ekspresi jijik: 76,45%, serta ekspresi takut: 76,44%. Rerata persentase wajah mudah dikenali sebesar 80,13%.

Tabel 4.1. Tabulasi Jawaban Kuisisioner Persepsi Visual Terhadap Hasil Sintesis Ekspresi

Sintesis Ekspresi	Model Manusia	Model Angsa	Model Kera	Rerata per Ekspresi
Terkejut	89,58	89,58	88,79	89,32
Senang	85,42	83,33	85,15	84,63
Jijik	77,08	75,00	77,27	76,45
Marah	79,17	75,00	75,76	76,64
Takut	77,08	77,08	75,15	76,44
Sedih	75,00	83,33	73,64	77,32
Rerata Ketepatan	80,56	80,55	79,29	80,13

4.9 Pembahasan Hasil Sintesis dan Kuisisioner

Perhitungan perubahan ekspresi wajah model tiga dimensi dengan menggunakan metode deformasi linier telah dapat dilakukan dengan basis segmentasi *feature-point clustering* dan perubahan secara linier menggunakan titik fitur sebanyak 33 titik hasil transformasi *retargeting* menggunakan *radial basis function*. Penghitungan tersebut telah menghasilkan perubahan titik-titik verteks sebagai akibat adanya perubahan posisi *centroid* atau terjadinya pergerakan. Deformasi yang terjadi pada wajah tiga dimensi terbentuk pergerakannya secara linier berdasarkan pada perubahan titik fitur pada setiap *frame* yang membentuk setiap pergerakan animasi wajah yang mencerminkan enam ekspresi dasar yaitu senang, marah, sedih, takut, terkejut, dan jijik.

Berdasarkan hasil evaluasi pada enam ekspresi dasar yang digunakan pada tahap pengujian, yaitu: sedih, senang, marah, takut, jijik dan terkejut, hasil *retargeting* dapat memetakan ulang titik fitur pada wajah model 3D sesuai dengan pergerakan titik marker pada citra wajah 2D yang menjadi wajah sumber animasi. Perubahan ekspresi yang terjadi sudah sesuai dengan persyaratan minimal pada perubahan FACS, sehingga ekspresi yang terbentuk sesuai dengan teori FACS.

Presentase hasil kuisisioner tentang implementasi sintesis ekspresi wajah ke model 3D menunjukkan secara gamblang bahwa visualisasi ekspresi wajah walaupun telah memenuhi syarat teoritis, ternyata pada implementasinya tidak selalu mampu menggambarkan sempurna kondisi yang diinginkan, yaitu rerata persentase ekspresi wajah mudah dikenali sebesar 80,13%. Oleh karena itu pengaruh animator dalam kendali perbaikan ekspresi secara mikro ataupun penambahan unsur prinsip melebih-lebihkan (*exaggeration*) di pembuatan animasi ekspresi wajah sangat penting untuk menghasilkan ekspresi wajah yang mudah dikenali oleh penonton.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penjejukan fitur berbasis koherensi temporal mampu memproses banyak citra secara berurutan dan memiliki hasil yang baik. Komputasi yang digunakan pada metode ini sangat efisien dan tidak memerlukan tahapan pembelajaran pola fitur di awal. Keseluruhan proses dapat dilakukan dengan pengontrolan kondisi alat, ruang, material dan pencahayaan yang konstan sehingga dapat mengurangi perhitungan komputasi di proses ekstraksi fitur penanda citra. Pada penelitian ini menggunakan nilai ambang batas 0,2824.

Daerah gerak secara adaptif mampu dihasilkan berdasarkan model wajah 3D, hal ini ditunjukkan pada jumlah persentase luasan daerah yang dibentuk berdasarkan *feature-point* dan hasil cluster yang terbentuk menyesuaikan bentuk model wajah kartun 3D. Modifikasi proses clusterisasi menggunakan peta wajah ortogonal dapat memperbaiki peletakan vertek yang salah pada cluster dan secara visual dapat bekerja dengan baik pada permukaan jika dibandingkan dengan metode klasik. Pertimbangan penggunaan formula *great circle distance* memiliki tren data keanggotan vertek pada tiap *feature-point* berupa grafik yang naik dan secara visual mampu melakukan segmentasi area gerak pada wajah secara adaptif. Namun jika dibandingkan dengan hasil modifikasi metode klasik dengan menggunakan peta wajah ortogonal, maka perhitungan komputasi yang dilakukan lebih banyak dan kompleks sehingga membutuhkan kapasitas memori yang tinggi.

Berdasarkan hasil evaluasi pada enam ekspresi dasar yang digunakan pada tahap pengujian *retargeting*, yaitu: sedih, senang, marah, takut, jijik dan terkejut, transformasi ruang RBF dapat memetakan ulang titik fitur pada wajah model 3D sesuai dengan pergerakan titik *marker* pada citra wajah 2D yang menjadi wajah sumber animasi. Transformasi ruang RBF dapat mengatasi perbedaan bentuk/morfologi wajah sumber animasi dengan wajah target animasi. Hal ini ditunjukkan dengan posisi titik *marker* pada citra wajah yang tidak simetris ternyata tidak

merusak pemetaan ulang titik fitur pada wajah model 3D yang ditunjukkan pada hasil perubahan pose masing-masing model wajah karakter kartun 3D.

Hasil persepsi visual penonton yang didapatkan secara umum dari kuisioner evaluasi penerapan sintesis ekspresi wajah realistik keenam ekspresi tersebut adalah: ekspresi terkejut memiliki persentasi paling tinggi mudah dikenali, yaitu: 89,32%. Ekspresi senang: 84,63 %, ekspresi sedih: 77,32%, ekspresi marah: 76,64%, ekspresi jijik: 76,45%, serta ekspresi takut: 76,44%. Rerata persentase wajah mudah dikenali sebesar 80,13%.

Berdasarkan semua tahapan eksperimentasi yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa sintesis ekspresi wajah realistik dengan basis *feature-point cluster* menggunakan *radial basis function* dapat diterapkan pada beragam model wajah 3D dan dapat secara adaptif peka terhadap bentuk wajah dari masing-masing model 3D yang memiliki jumlah fitur penanda yang sama. Hal ini menunjukkan bahwa sistem ini dapat membantu mempersingkat proses duplikasi gerakan yang serupa pada beragam bentuk model wajah 3D.

5.2 Saran

Upaya pengembangan sistem dapat dilakukan dengan cara perbandingan metode yang memiliki kesamaan fungsi dan rancangan hasil. Nilai kehandalan dan akurasi dari hasil penelitian ini dapat ditingkatkan pula dengan pengujian sistem menggunakan data visual wajah yang beragam dan memiliki ragam kualitas citra.

Pengujian algoritma *Feature-point Clustering* ini dapat ditingkatkan supaya handal dalam proses otomatisasi berdasarkan pada data *feature-point* atau *marker* dengan pengujian perbandingan menggunakan metode segmentasi lainnya atau tes evaluasi proses seketika. Selain itu pengaruh kendali perbaikan ekspresi secara mikro ataupun penambahan unsur prinsip melebih-lebihkan (*exaggeration*) di pembuatan animasi ekspresi wajah sangat penting untuk meningkatkan persentase ekspresi wajah yang mudah dikenali oleh penonton.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrantes, G. A., & Pereira, F. (1999). Mpeg-4 facial animation technology: Survey, implementation, and results. *IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology*, 9(2), (hal. 290–305).
- Aggarwal, J., & Cai, Q. (1999). Human Motion Analysis: A review. *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 73 No.3, (hal. 428-440).
- Arai, K., Kurihara, T., & Anjyo, K. (1996). Bilinear interpolation for facial expression and metamorphosis in real-time animation. *The Visual Computer vol 12*, 105–116.
- Beier, T., & Neely, S. (1992). Feature-based image metamorphosis. *SIGGRAPH Proceedings* (hal. 35-42). ACM Press.
- Bergeron, P., & Lachapelle, P. (1985). *Controlling facial expression and body movements in the computer generated short "tony de peltrie"*.
- Blanz, V., & Vetter, T. (1999). A morphable model for the synthesis of 3d faces. *SIGGRAPH proceedings*.
- Catmull, E., & Clark, J. (1978). Recursively generated b-spline surfaces on arbitrary topological meshes. *Computer Aided Design*, 10(6), 350-355.
- Chai, J., Xiao, J., & Hodgins, J. (2003). Vision-based control of 3D facial animation. *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on computer animation*, (hal. 193-206).
- Chenoweth, M. E. (2012). *A Local Radial Basis Function Method for the Numerical Solution of Partial Differential Equations*. Theses, Dissertations and Capstones, Paper 243.
- Choe, B., & Ko, H. (2001). Analysis and synthesis of facial expressions with hand-generated muscle actuation basis. *IEEE Computer Animation Conference*, (hal. 12-19).
- Choe, B., Lee, H., & Ko, H. (2001). Performance driven muscle based facial animation. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 12(2), 67-79.
- Chuang, E., & Bregler, C. (2005). Moodswings: Expressive speech animation. *ACM Trans. on Graph.*, 24(2).
- Chung, S.-K. (2010). Facial Animation: A Survey Based on Artistic Expression Control. *Journal of Performing and Visual Arts Studies Volume 2, Issue 1*, 131-162.
- Coquillart, S. (1990). Extended free-form deformation: A sculpturing tool for 3d geometric modeling. *Computer Graphics*, 24, 187–193.
- Curio, C., Breidt, M., Kleiner, M., Vuong, Q. C., Giese, M. A., & Bulthoff, H. H. (2006). Semantic 3D Motion Retargeting for Facial Animation. *Proc. of the 3rd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*.
- Darrell, T., & Pentland, A. (1993). Spacetime gestures. *Computer Vision and Pattern Recognition*.
- Deng, Z., Chiang, P., Fox, P., & Neumann, U. (2006). Animating blendshape faces by cross-mapping motion capture data. *Proceedings of the 2006 symposium on Interactive 3D graphics and games*, (hal. 43-48).

- Deng, Z., Lewis, J. P., & Neumann, U. (2005). Automated eye motion synthesis using texture synthesis. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 24–30.
- Derose, T., Kass, M., & Truong, T. (1998). Subdivision surfaces in character animation. *SIGGRAPH Proceedings*, (hal. 85–94).
- Dutreve, L., Meyer, A., & Bouakaz, S. (2008). Feature points based facial animation retargeting. *Proceedings of the 15th ACM symposium on virtual reality software and technology*. ACM.
- Dutreve, L., Meyer, A., & Bouakaz, S. (2009). Real-time Dynamic Wrinkles of Face for Animated Skinned Mesh. *Proceedings of 5th International Symposium Visual Computing (ISVC)* (hal. 25-34). Springer.
- Dutreve, L., Meyer, A., Orvalho, V., & Bouakaz, S. (2010). Easy Rigging of Face by Automatic Registration and Transfer of Skinning Parameters. *Proceedings of the 2010 International Conference on Computer Vision and Graphics*.
- Eisert, P., & Girod, B. (1998). Analyzing facial expressions for virtual conferencing. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 18(5), 70-78.
- Ekman, P., & Friesen, W. V. (1978). *Facial Action Coding System: a technique for the measurement of facial movement*. Palo Alto: Consulting Psychologists Press.
- Escher, M., Pandzic, I. S., & Thalmann, N. M. (1998). Facial deformations for mpeg-4. *Proc. of Computer Animation '98*, (hal. 138–145).
- Essa, I., Basu, S., Darrell, T., & Pentland, A. (1996). Modeling, tracking and interactive animation of faces and heads using input from video. *Proceedings of Computer Animation*, (hal. 85–94).
- Essa, I., Basu, S., Darrell, T., & Pentland, A. (1996). Modeling, Tracking and Interactive Animation of Faces and Heads Using Input from Video. *Proceedings of Computer Animation*, (hal. 85-94).
- Faigin, G. (2008). *The artist's complete guide to facial expressions 2nd Edition*. New York: Watson-Guption Publications.
- Hanrahan, P., & Sturman, D. (1985). Interactive Animation of Parametric Models. *The Visual Computer 1:4*, 260-266.
- Hjortsjo, C. (1970). *Man's Face and Mimic Language*. Malm: Nordens Boktryckeri.
- Horn, B., & Schunck, B. (1981). Determining optical flow. *Artificial Intelligence*, 185–203.
- Hubbert, S., Gia, Q. L., & Morton, T. M. (2015). *Spherical Radial Basis Functions, Theory and Applications*. (N. Bellomo, M. Benzi, P. E. Jorgensen, T. Li, R. Melnik, O. Scherzer, . . . P. Zhang, Penyunt.) Cham Heidelberg New York Dordrecht London: Springer.
- J. Chai, J. X. (2003). Vision-based control of 3d facial animation. *Proc. of Symposium on Computer Animation*, (hal. 193–206).
- Joshi, P., Tien, W., Desbrun, M., & Pighin, F. (2003). Learning controls for blend shape based realistic facial animation. *Eurographics/SIGGRAPH Symposium on Computer Animation* (hal. 187–192). ACM Press.
- Ju, E., & Lee, J. (2008). Expressive Facial Gestures From Motion Capture Data. *Eurographics*.

- Kalra, P., Mangili, A., Thalmann, N., & Thalmann, D. (1992). Simulation of facial muscle actions based on rational free from deformations. *Eurographics, vol 11*, (hal. 59–69).
- Khullar, S. C., & Badler, N. (1999). Where to look? automating visual attending behaviors of virtual human characters. *Proc. of Third ACM Conf. on Autonomous Agents*, (hal. 16–23).
- Ko, J.-G., Kim, K.-N., & Ramakrishna, R. (1999). Facial Feature Tracking for Eye-Head Controlled Human Computer Interface. *TENCON'99*. Cheju-Korea: IEEE.
- Kshirsagar, S., Garchery, S., & Thalmann, N. (2000). Feature point based mesh deformation applied to mpeg-4 facial animation. *Proc. Deform'2000, Workshop on Virtual Humans by IFIP Working Group 5.10*, (hal. 23–34).
- Kwon, J.-Y., & Lee, I.-K. (2008). Exaggerating Character Motions Using Sub-joint Hierarchy. *Computer Graphics Forum Vol 27*, 1677-1686.
- Kwon, J.-Y., & Lee, I.-K. (2012). The Squash-and-Stretch Stylization for Character Motions. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics Vol 18*, 488-500.
- Lazzeri, N., Mazzei, D., Greco, A., Lanata, A., Rossi, D. D., & Rotesi, A. (2015). Expressive Humanoid Face: a Preliminary Validation Study. *The 8th International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*.
- Lee, S. P., Badler, J. B., & Badler, N. (2002). Eyes alive. *ACM Trans. Graph.(Proc. of ACM SIGGRAPH'02)*, 21(3), (hal. 637–644).
- Lee, Y., Terzopoulos, D., & Waters, K. (1995). Realistic face modeling for animation. *SIGGRAPH proceedings*, (hal. 55-62).
- Lewis, J., Cordner, M., & Fong, N. (2000). Pose space deformation. *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (hal. 165-172). SIGGRAPH.
- Lewis, J., Mooser, J., Deng, Z., & Neumann, U. (2005). Reducing blendshape interference by selected motion attenuation. *Proceedings of ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games (I3DG)*, (hal. 25-29).
- Lucey, P., Cohn, J. F., Kanade, T., Saragih, J., & Ambadar, Z. (2010). The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (hal. 94-101). San Francisco, CA: IEEE.
- Moeslund, T. (1999). The Analysis-by-Synthesis Approach in Human Motion Capture: A Review. *The 8th Danish conference on pattern recognition and image analysis*. Denmark: Copenhagen University.
- Noh, J., & Neumann, U. (2001). Expression cloning. *Proceedings of the 28th annual conference on computer graphics and interactive techniques* (hal. 277-288). SIGGRAPH.
- Orvalho, V. C., Zacur, E., & Susin, A. (2006). Transferring Facial Expressions to Different Face Models. *Ibero-American Symposium on Computer Graphics - SIACG (2006)*. The Eurographics Association.

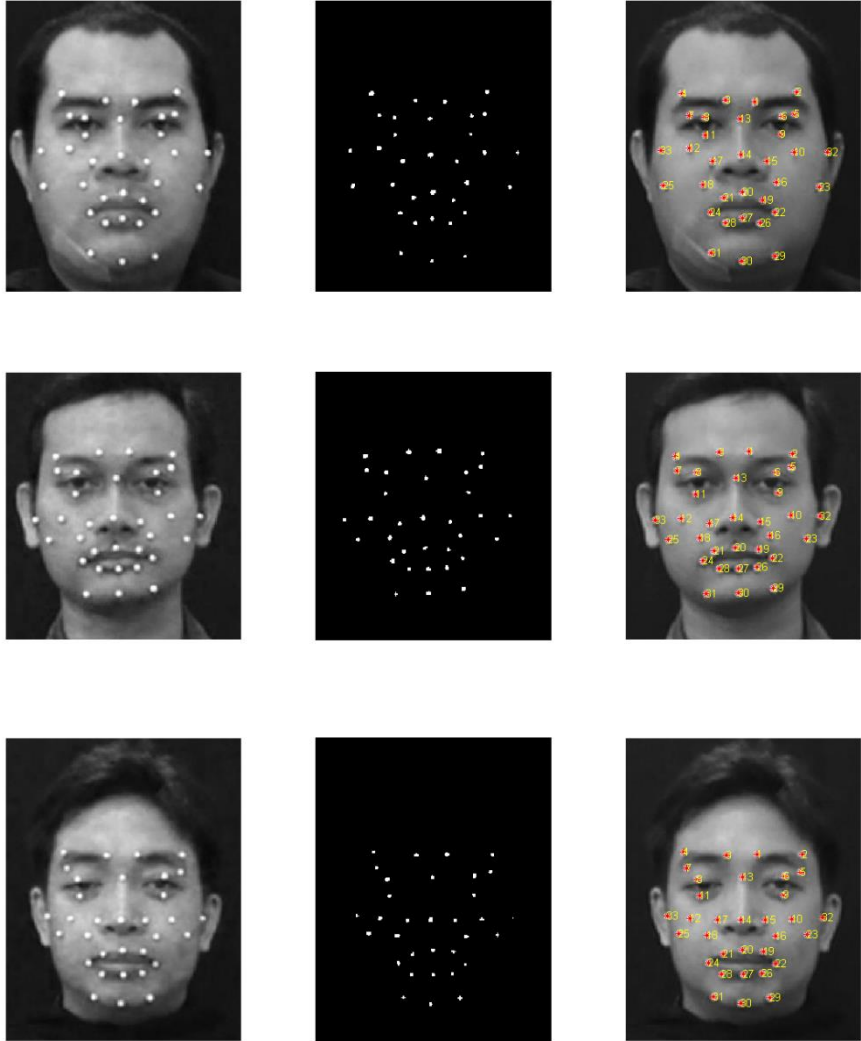
- Orvalho, V. C., Zacur, E., & Susin, A. (2008). Transferring the Rig and Animations from a Character to Different Face Models. *Computer Graphics Forum Vol. 27 No. 8*, 1997-2012.
- Orvalho, V. C., Zacur, E., & Susin, A. (2008). Transferring the Rig and Animations from a Character to Different Face Models. *COMPUTER GRAPHICS FORUM Volume 27 Number 8*, (hal. 1997–2012).
- Pandzic, I. (2002). Facial animation framework for the web and mobile platforms. *Proc. of the 7th Int'l Conf. on 3D Web technology*.
- Parke, F. (1972). Computer Generated Animation of Face. *Proceedings of the ACM annual conference* (hal. 451-457). ACM.
- Parke, F. (1974). *A parametric model for human faces*. Utah: Ph.D. Thesis, University of Utah.
- Parke, F., & Waters, K. (2008). *Computer Facial Animation 2nd Edition*. Massachusetts: AK Peters.
- Perales, F. (2002). Human Motion Analysis & Synthesis using Computer Vision and Graphics Techniques: State of Art and Applications. *Workshop on Centre of Computer Graphics and Data Visualisation*. Czech Republic: University of West Bohemia.
- Pighin, F., Auslander, J., Lischinski, D., Salesin, D., & Szeliski, R. (1997). *Realistic facial animation using image-based 3d morphing*.
- Pighin, F., Hecker, J., Lischinski, D., Szeliski, R., & Salesin, D. (1998). Synthesizing realistic facial expressions from photographs. *SIGGRAPH Proceedings*, (hal. 75-84).
- Poggio, T., & Girosi, F. (1989). *A theory of networks for approximation and learning*.
- Powell, M. (1987). Radial basis functions for multivariable interpolation: a review. Dalam *Algorithms for approximation* (hal. 143-167).
- Pyun, H., Kim, Y., Chae, W., Kang, H. W., & Shin, S. (2003). An example-based approach for facial expression cloning. *Proc. of Symposium on Computer Animation*, (hal. 167–176).
- Sederberg, T., & Parry, S. (1996). Free-form deformation of solid geometry models. *Computer Graphics, SIGGRAPH, volume 20*, 151–160.
- Sederberg, T., & Parry, S. (1996). Free-form Deformation of Solid Geometry Models. *Computer Graphics Vol. 20*, 151-160.
- Sera, H., Morishima, S., & Terzopoulos, D. (1996). Physics-based muscle model for mouth shape control. *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, 207-212.
- Shiple, T. F., & Brumberg, J. S. (2005). *Markerless Motion-capture for Point-light Displays*. Philadelphia: Biological Motion Project, Department of Psychology, Temple University.
- Sifakis, E., Neverov, I., & Fedkiw, R. (2005). Automatic determination of facial muscle activations from sparse motion capture marker data. *ACM Trans. Graph 24(3)*, (hal. 417–425).
- Singh, K., & Fiume, E. (1998). Wires: A geometric deformation technique. *SIGGRAPH Proceedings*, (hal. 405–414).

- Sobottka, K., & Pitas, I. (1997). A Fully Automatic Approach to Facial Feature Detection and Tracking. *International Conference on Audio- and Video-based Biometric Person Authentication*. Crans-Montana, Switzerland.
- Sumner, R. W., & Popovic, J. (2004). Deformation transfer for triangle meshes. *ACM Trans. Graph.*, 23(3), 399–405.
- Tenenbaum, J. B., & Freeman, W. T. (2000). Separating style and content with bilinear models. *Neural Computation*, 12(6), 1247–1283.
- Thalmann, N. M., & Thalmann, D. (1996). *Interactive Computer Animation*. Prentice Hall.
- Umenhoffer, T., & Toth, B. (2012). Facial Animation Retargeting Framework Using Radial Basis Functions . *6th Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry*. Budapest.
- Utsugi, K., Naemura, T., Oikawa, M., & Koike, T. (2011). E-IMPACT: Exaggerated Illustrations using Multi-perspective Animation Control Tree Structure. *Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*.
- Vertegaal, R., Slagter, R., Derveer, G. V., & Nijholt, A. (2001). Eye gaze patterns in conversations: There is more to conversational agents than meets the eyes. *Proc. of ACM CHI 2001 Conference on Human Factors in Computing Systems*, (hal. 301–308).
- Viad, M., & Yahia, H. (1992). Facial animation with wrinkles. *Proceedings of the Third Eurographics Workshop on Animation and Simulation*.
- Vlasic, D., Brand, M., Pfister, H., & Popovic, J. (2005). Face transfer with multilinear models. *ACM Trans. Graph.*, 24(3), 426–433.
- Wang, C., & Forsy, D. (1994). Langwidere: A new facial animation system. *Proceedings of Computer Animation*, (hal. 59-68).
- Waters, K. (1987). A muscle model for animating three-dimensional facial expression. *SIGGRAPH Proceedings, volume 21*, (hal. 17–24).
- Waters, K., & Levergood, T. (1993). *Decface: An automatic lip-synchronization*.
- Weise, T., Bouaziz, S., Li, H., & Pauly, M. (2011). Realtime Performance-Based Facial Animation. *Journal ACM Transactions on Graphics*.
- Weise, T., Bouaziz, S., Li, H., & Pauly, M. (2011). Realtime Performance-Based Facial Animation. *Proceedings of the 38th ACM SIGGRAPH Conference and Exhibition*. ACM Transactions on Graphics.
- Zhang, L., Snavely, N., Curless, B., & Seitz, S. (2004). Spacetime faces: high resolution capture for modeling and animation. *ACM Trans. Graph.*, 23(3), (hal. 548–558).

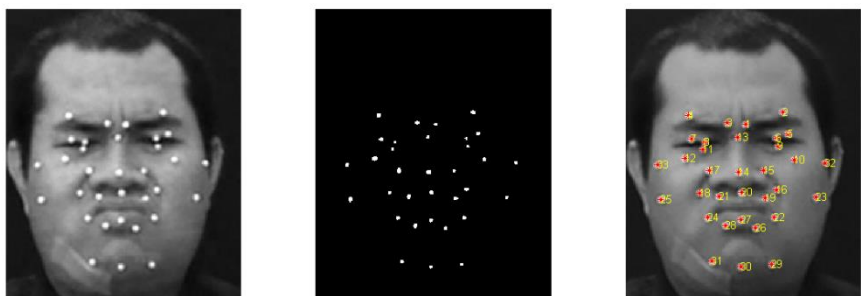
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

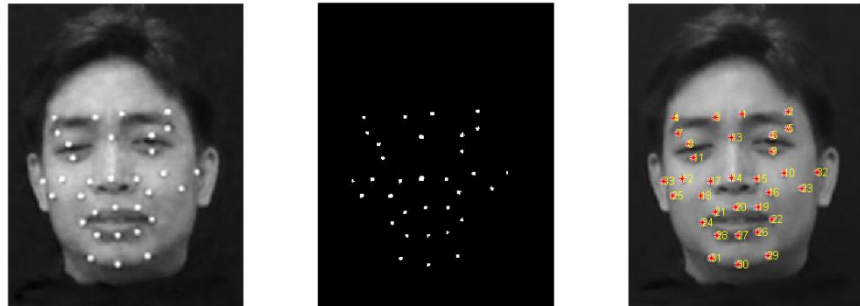
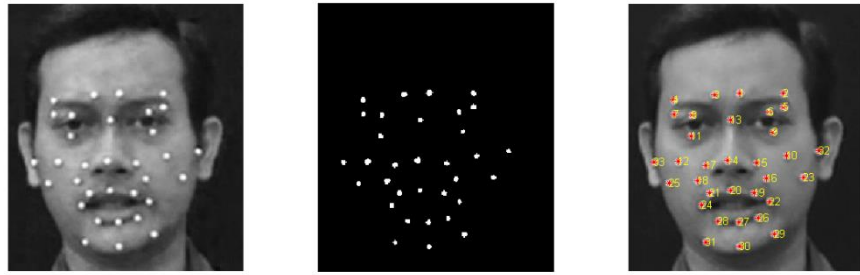
LAMPIRAN

1. Ragam Data Ekspresi Wajah Netral

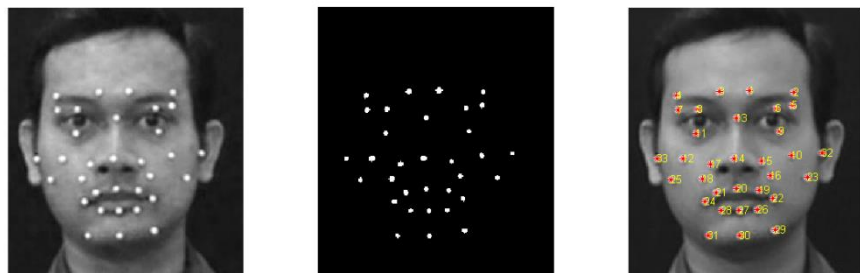
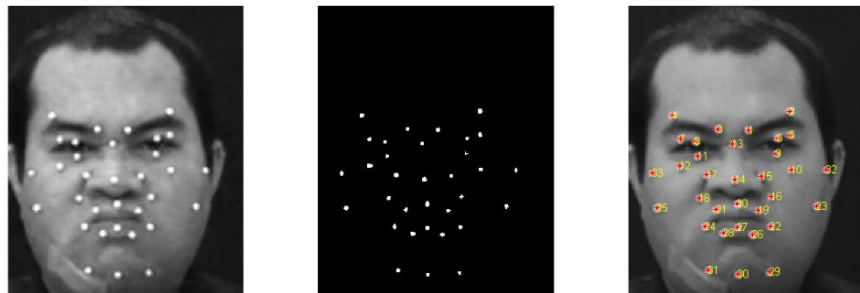


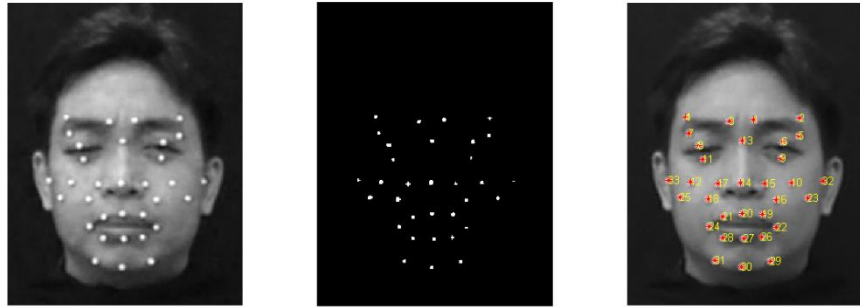
2. Ragam Data Ekspresi Wajah Jijik



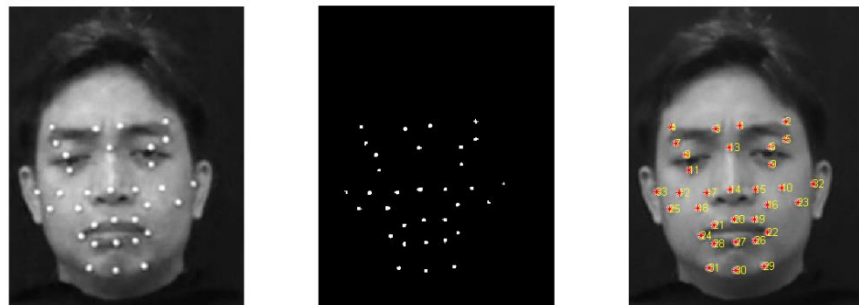
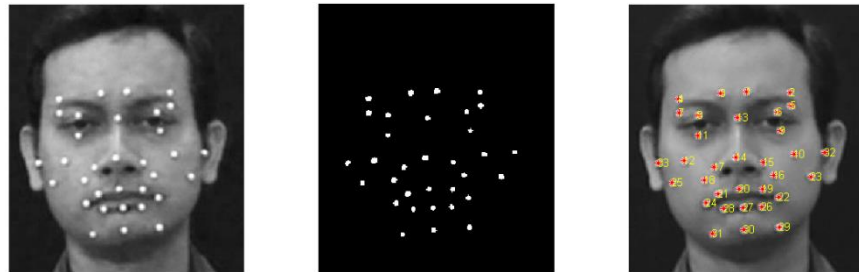
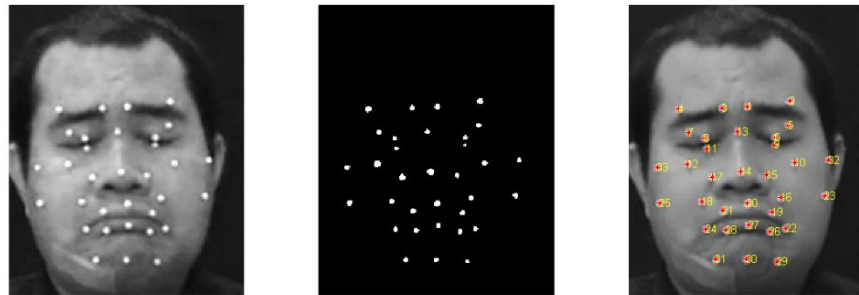


3. Ragam Data Ekspresi Wajah Marah

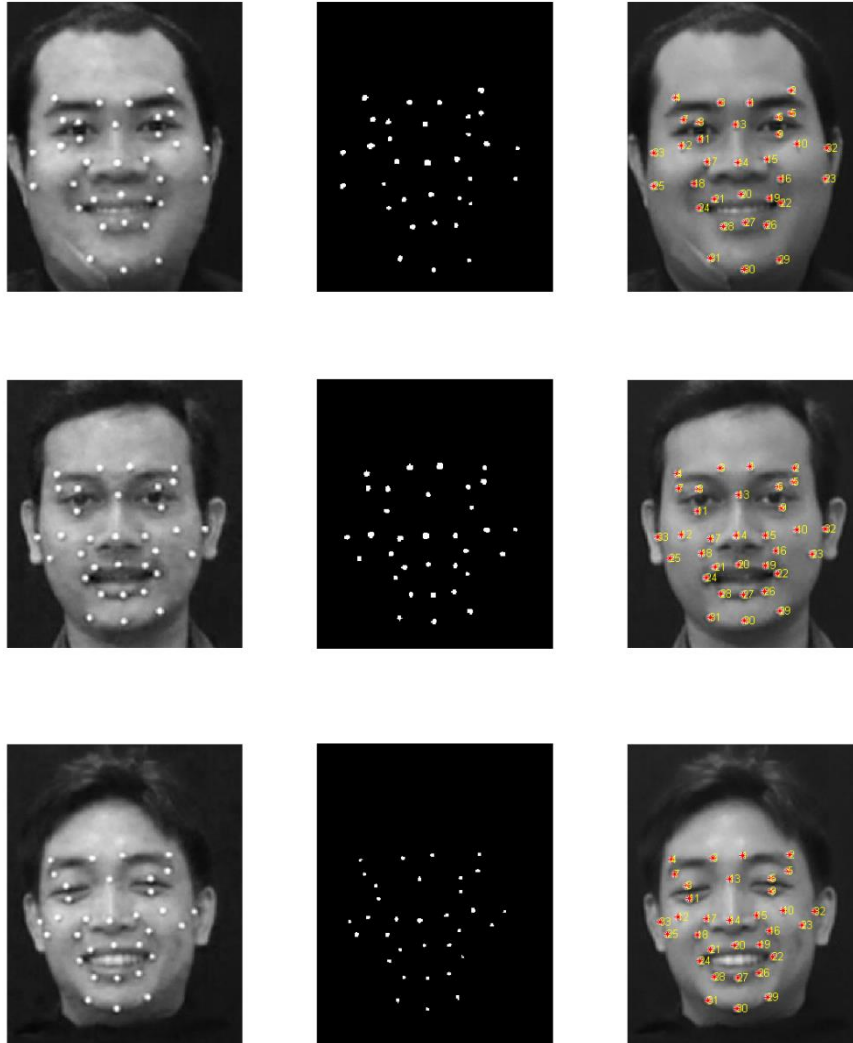




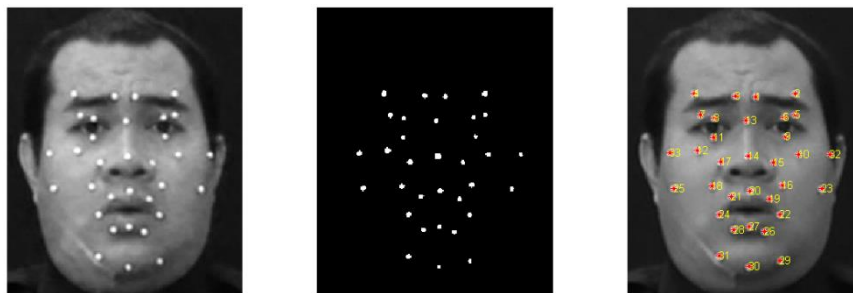
4. Ragam Data Ekspresi Wajah Sedih

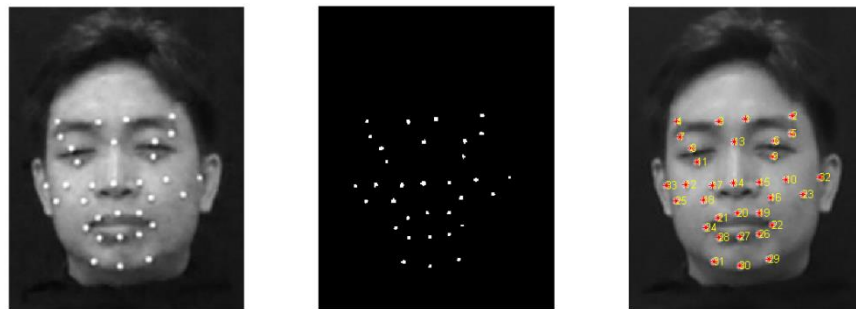
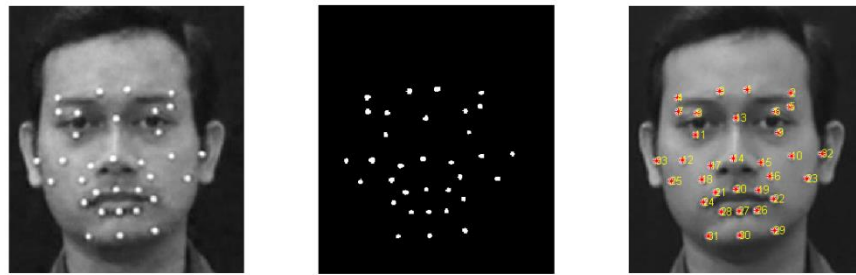


5. Ragam Data Ekspresi Wajah Senang

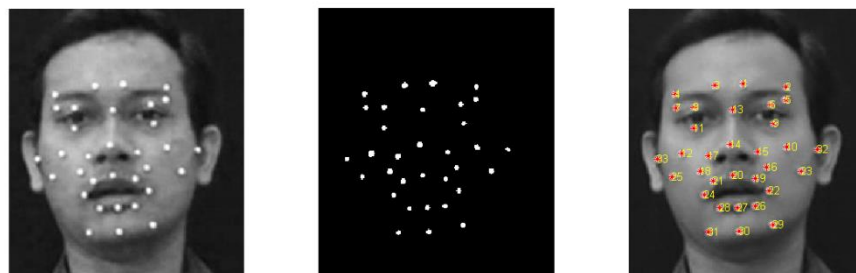
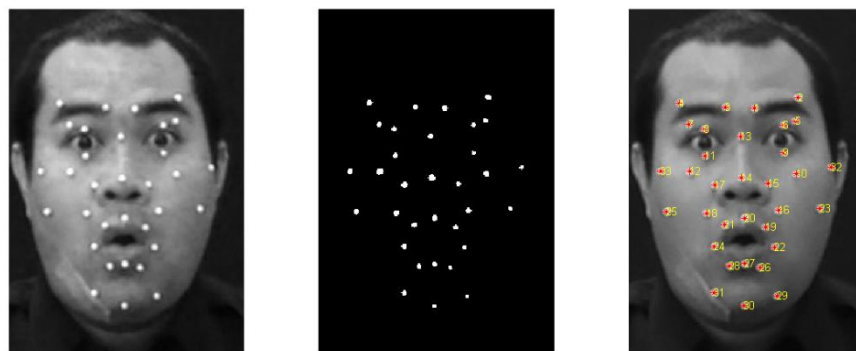


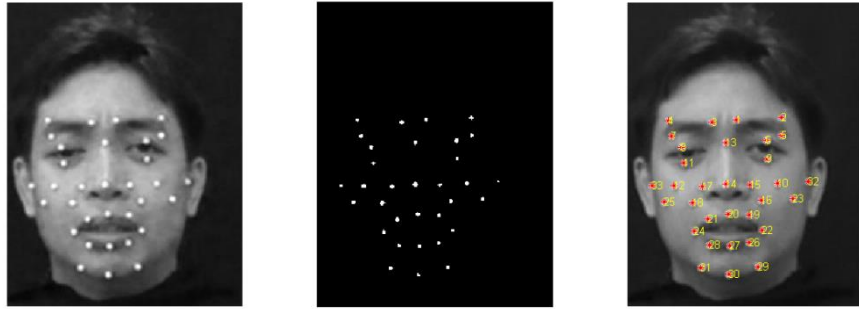
6. Ragam Data Ekspresi Wajah Takut





7. Ragam Data Ekspresi Wajah Terkejut



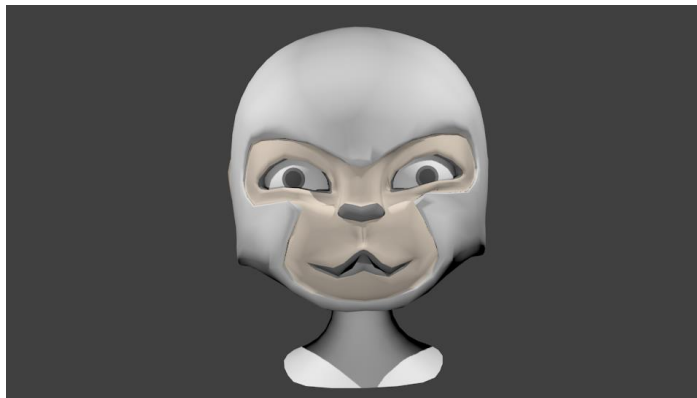


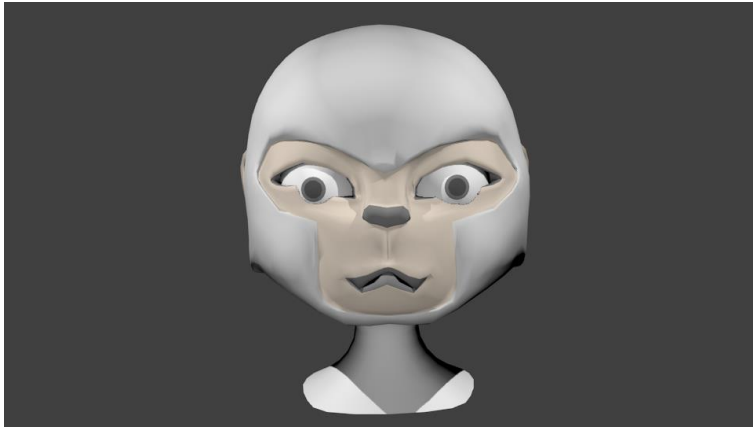
8. Cuplikan Ragam Ekspresi Model Kartun 3D: Doni Duck





9. Cuplikan Ragam Ekspresi Model Kartun 3D: Young Anoman








10. Kuisiener Evaluasi Hasil Sintesis Ekspresi Wajah Realistik




KUISIONER EVALUASI HASIL SINTESIS EKSPRESI WAJAH REALISTIK PADA MODEL WAJAH 3D

Tujuan: Kuisiener ini digunakan untuk mengumpulkan respon dari hasil sintesis ekspresi wajah realistik pada model wajah 3D.

1. Apakah saudara pernah mendapatkan pengetahuan/bekerja dalam bidang animasi?
 - a. Pernah
 - b. Tidak Pernah

2. Pilihlah ekspresi yang cocok pada tabel hasil sintesis ekspresi wajah realistik berikut ini:

		<p>Gambar disamping ini menunjukkan ekspresi:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Sedih b. Senang c. Jijik d. Takut e. Marah f. Terkejut
		<p>Gambar disamping ini menunjukkan ekspresi:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Sedih b. Senang c. Jijik d. Takut e. Marah f. Terkejut
		<p>Gambar disamping ini menunjukkan ekspresi:</p> <ol style="list-style-type: none"> a. Sedih b. Senang c. Jijik d. Takut e. Marah f. Terkejut

		<p>Gambar disamping ini menunjukkan ekspresi:</p> <ol style="list-style-type: none"> Sedih Senang Jijik Takut Marah Terkejut
		<p>Gambar disamping ini menunjukkan ekspresi:</p> <ol style="list-style-type: none"> Sedih Senang Jijik Takut Marah Terkejut
		<p>Gambar disamping ini menunjukkan ekspresi:</p> <ol style="list-style-type: none"> Sedih Senang Jijik Takut Marah Terkejut

3. Terima kasih atas respon saudara dalam kuisisioner ini.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Samuel Gandang Gunanto, Pria kelahiran Pringsewu pada tanggal 16 Oktober 1980 ini menempuh pendidikan tinggi S-1 Fisika di Universitas Gadjah Mada pada tahun 1999-2004, S-1 Teknik Informatika di Universitas Kristen Duta Wacana pada tahun 2000-2004. Program Pascasarjana S-2 Teknik Elektro dengan bidang keahlian Jaringan Cerdas Multimedia(Teknologi Permainan) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2008-2010. Saat ini beliau sedang menyelesaikan Program Doktorat S-3 Teknik Elektro di kampus yang sama, yaitu Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2011-2017.

Bidang keahlian yang diminati sebagai seorang dosen di Program Studi Animasi, Institut Seni Indonesia Yogyakarta sejak tahun 2005 sampai sekarang adalah komputasi seni media, teknologi animasi dan game, humaniora digital, dan visi komputer. Beliau sangat senang berdiskusi dan tukar pengetahuan di bidang-bidang tersebut. Alamat email yang dapat dihubungi: gandang@isi.ac.id dan gandang6@gmail.com .

(Halaman ini sengaja dikosongkan)