

MODUL

Penggunaan Script MATLAB

Tomografi Seismik

(Tugas Akhir : "Inversi Tomografi *Crosshole Seismic Near Surface* Menggunakan Metode Pseudoinverse dan *Least Square QR (LSQR)*")

Oleh :

Erdyanti Rinta Bi Tari
NRP. 03411540000024

Dosen Pembimbing :

1. Dr. Dwa Desa Warnana
NIP. 19760123 200003 1 001
2. Juan Pandu G.N.R, S. Si, M.T.
NIP. 19890612 201504 1 003



Departemen Teknik Geofisika
Fakultas Teknik Sipil, Lingkungan, dan Kebumihan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

Daftar Isi

Daftar Isi	i
Keterangan	iii
I. Model	1
II. Fitur Utama	3
<i>Forward Modelling</i>	3
Inversi Tomografi	5
III. Fitur Tambahan	7
IV. Daftar Script dan Kegunaannya	9
1. Run	9
2. Pembuatan Model	9
3. Pembuatan <i>source</i> dan <i>receiver</i>	9
4. Plot	9
5. Pembuatan Model Awal	9
6. <i>Looping</i> penelusuran raypath	9
7. <i>Forward modelling</i> dan perhitungan teta	10
8. Logika arah <i>raypath</i>	10
9. <i>Smoothing</i>	10
10. Save Parameter Inversi	10
Daftar Pustaka	11

Halaman ini sengaja dikosongkan

Keterangan

Script ini berupa script MATLAB yang beberapa variabelnya perlu disesuaikan. Hal-hal yang perlu disesuaikan dijelaskan pada modul ini dan diberi tanda sebagai berikut :

warna biru : variabel yang nilainya perlu disesuaikan

warna hijau : function yang perlu dipilih (ubah function yang digunakan)

warna kuning : nilai yang perlu disesuaikan

Penyesuaian-penyesuaian ini HANYA perlu dilakukan pada script **run_seistomo.m**.

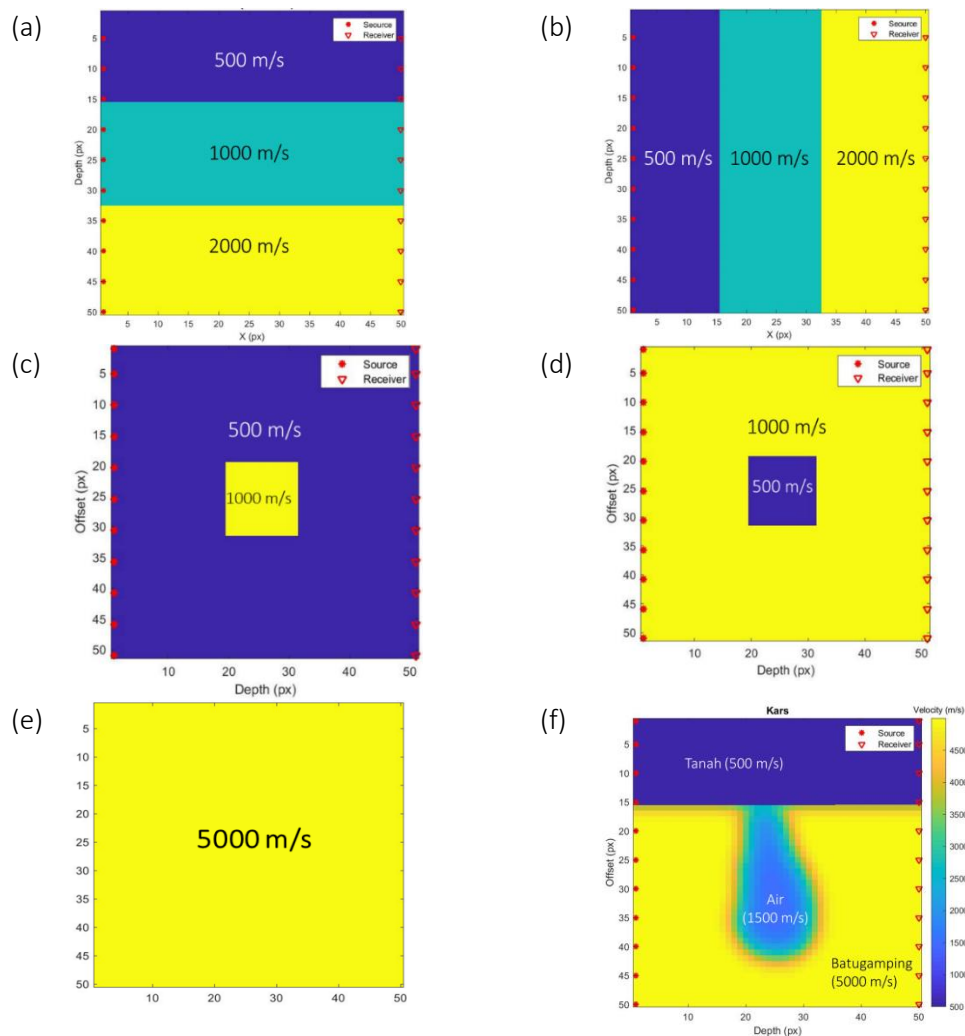
Halaman ini sengaja dikosongkan

I. Model

Pengaturan model terdiri dari 2 hal, yaitu *velocity model* serta posisi *source* dan *receiver*. Terdapat 6 tipe *velocity model* yang diuji; yang dibuat dengan function, yaitu

No.	Jenis Model	Function
1.	3 lapis horizontal	model_3LapHor.m
2.	3 lapis vertikal	model_3LapVer.m
3.	anomali <i>high velocity</i>	model_AnomHigh.m
4.	anomali <i>low velocity</i>	model_AnomLow.m
5.	homogen	model_Hom.m
6.	kars	model_kars.m

Keenam tipe model ini ditunjukkan pada gambar 1.1.



Gambar 1. 1. Gambar model (a) 3 lapis horizontal; (b) 3 lapis vertikal; (c) anomali *high velocity*; (d) anomali *low velocity*; (e) homogen; dan (f) kars.

Posisi *source* dan *receiver* diatur sesuai dengan konfigurasi *crosshole seismic*, yaitu masing-masing *source* dan *receiver* diposisikan pada kedua lubang bor (*hole*) sehingga gelombang seismik melalui model (*cross-*) menuju *receiver* yang ada di seberang *source*. *Source-receiver* ini dibuat dengan function `SR_XHole_L.m` dimana “L” berarti *source* berada di lubang kiri (*left*).

II. Fitur Utama

Script MATLAB Tomografi Seismik ini memiliki 2 fitur, yaitu :

1. uji forward modelling; dan
2. inversi tomografi.

Fitur ini dipilih dengan mengatur nilai dari variabel `Pilih.IF` , dimana nilai 1 adalah untuk Inversi dan 2 untuk *forward modelling*.

Forward Modelling

Fitur *forward modelling* akan menampilkan 3 sub-gambar :

- (a) *first arrival time* setiap sel serta *raypath* yang dirunut berdasarkan *travel time* tersebut;
- (b) kurva nilai *travel time* pada setiap receiver berdasarkan *forward modelling finite difference* dan *forward modelling* dari *raypath*; dan
- (c) selisih mutlak nilai *travel time* dari kedua *forward modelling*.

Forward modelling dilakukan untuk setiap *source*, sehingga gambar-gambar ini pun dibuat pada setiap *source* (Gambar 1.1). **Pemanfaatan fitur ini** utamanya adalah untuk melihat jalur *raypath* (*event refraksi*, *refleksi*, ataupun *direct*) serta melihat keakuratan *raypath* dibandingkan dengan *forward modelling finite difference*.

Forward modelling finite difference dilakukan dengan menggunakan script oleh Hogan (2005). *Forward modelling* ini menghasilkan *first arrival time* dari *source* ke setiap sel *velocity model*. *First arrival time* ini tentunya mengikuti hukum bahwa gelombang seismik merambat melalui jalur yang paling cepat.

Raypath dibuat berdasarkan paper oleh Oldenburg (1993) dengan memanfaatkan *first arrival time* pada setiap sel. Perunutan *raypath* dilakukan dari *receiver* ke *source*, bukan dari *source* ke *receiver*. Jika perunutan dilakukan dari *source* ke *receiver*, maka akan ada banyak kemungkinan *travel time* yang lebih besar dari titik awalnya. Namun jika dilakukan dari *receiver* ke *source*, perunutan lebih mudah dilakukan mengikuti *travel time* dari *receiver* hingga menuju *source* yang memiliki nilai *travel time* paling kecil (nol).

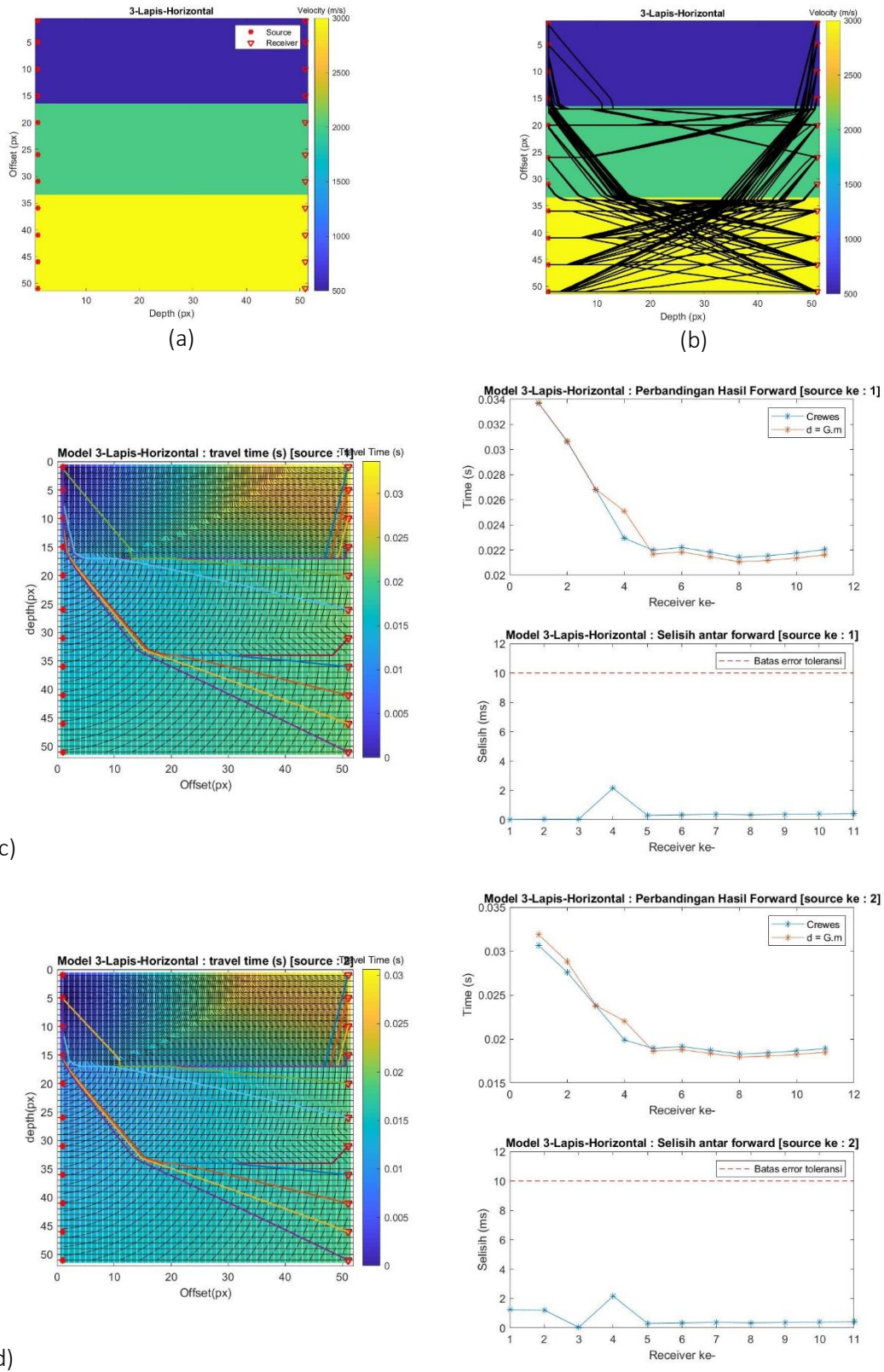
Arah-arah *raypath* pada setiap sel ditentukan berdasarkan nilai *steepest descent* yang merupakan kebalikan dari gradien *travel time* (penjelasan selengkapnya mengenai rumus perhitungan *steepest descent* ini dapat dilihat di dokumen Tugas Akhir atau pada referensi Oldenburg berjudul “Two-Dimensional Tomographic Inversion With Finite-Difference Traveltimes”). *Raypath* ini dihitung dengan melibatkan 4 sel *slowness*, sehingga untuk menghitung *travel time* dengan *raypath* tersebut, *raypath* perlu diidentifikasi lagi melalui sel *slowness* yang mana serta berapa jarak yang ditempuh pada setiap sel tersebut. *Travel time* dengan menggunakan *raypath* dihitung dengan

$$d = G \cdot m \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{1,1} & G_{1,2} & \cdots & G_{1,j} \\ G_{2,1} & G_{2,2} & \cdots & G_{2,j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{i,1} & G_{i,2} & \cdots & G_{i,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

dimana d_i adalah data ke- i (*travel time* pada setiap *receiver*), $G_{i,j}$ adalah jarak *raypath* data ke- i pada setiap sel *slowness* j , dan m_j adalah nilai *slowness* pada masing-masing sel j . Jika sel m_j tidak dilalui *raypath* i , maka nilai jarak $G_{i,j}$ otomatis bernilai nol. Nilai d (*first arrival time* pada setiap *receiver*

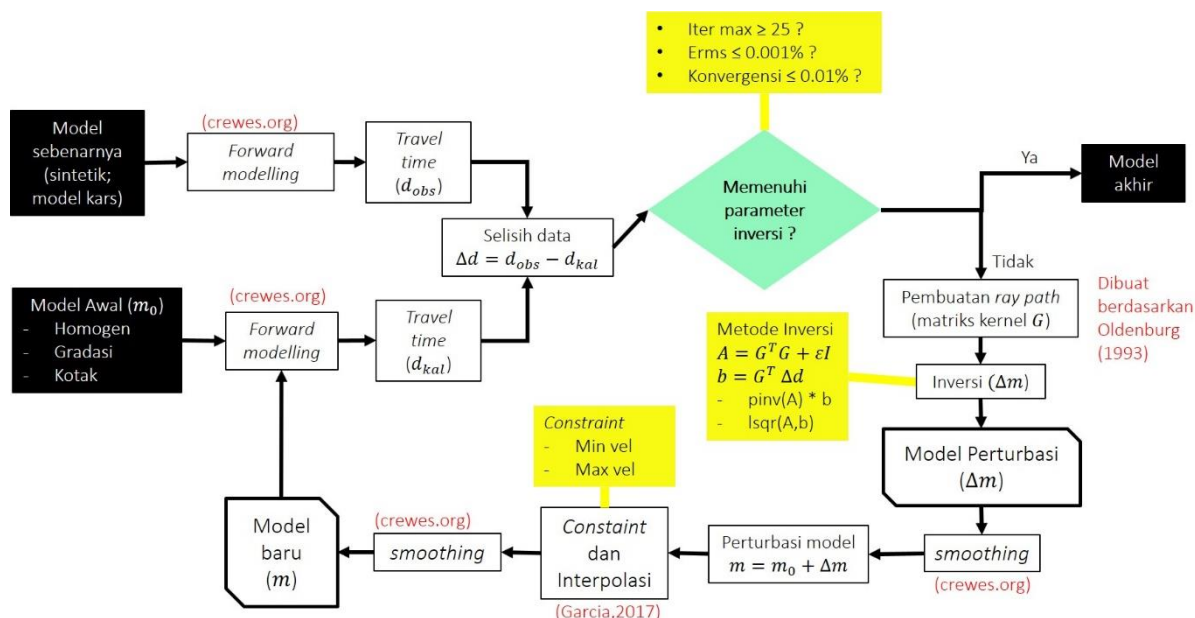
berdasarkan *raypath*) ini dibandingkan dengan nilai *first arrival time* hasil *forward modelling finite difference* untuk melihat keakuratan *raypath* yang telah dibuat (gambar 2.1. c dan d; kanan atas).



Gambar 2. 1. Gambar uji *forward modelling*. (a) *Velocity model*. (b) *Velocity model* dan *raypath* semua *source-receiver*. (c) Gambar untuk *source 1*. (d) Gambar untuk *source 2*.

Inversi Tomografi

Terdapat 2 tipe inversi yang digunakan pada script ini, yaitu pinv (pseudoinverse) dan lsqr (least square QR). Kedua tipe inversi dilakukan dengan menggunakan **fungsi internal** yang ada di MATLAB. Tipe inversi dapat dipilih dengan mengatur nilai **Pilih.TipeInversi**, dimana nilai 1 untuk pinv dan 2 untuk lsqr. Alur inversi ditunjukkan pada gambar 2.2.



Gambar 2. 2. Alur inversi

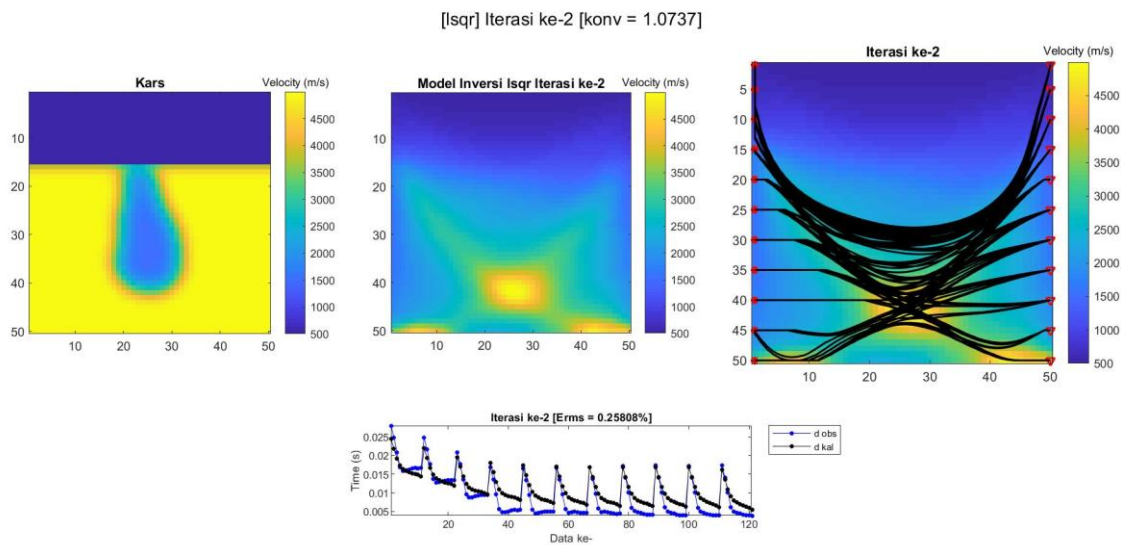
Terdapat beberapa parameter yang perlu diatur untuk inversi, yaitu

Variabel	Arti
Inv.eps	Parameter <i>damping</i> atau parameter regularisasi (ϵ)
Inv.min_vel	Batasan minimum dan maksimum <i>velocity</i> model hasil inversi
Inv.max_vel	
Inv.smoothing	Parameter smoothing untuk script velsmooth.m
Inv.E	Nilai E_{rms} minimum
Inv.konv	Nilai konvergensi minimum
Inv.iter	Nilai iterasi maksimum

Inversi ini membutuhkan model awal m_0 yang diatur dengan menggunakan **fungsi** ModelAwal.m dimana menghasilkan model awal gradasi dari velocity kecil ke besar dari atas ke bawah. Untuk model awal homogen, dibuat dengan fungsi yang sama namun dengan input maksimum velocity sama dengan minimum velocity. Sedangkan model kotak dibuat secara **manual** pada script run_seistomo.m.

Tipe model awal	Script
Homogen (5000 m/s)	[Model,Eq] = ModelAwal (Model, 5000, 5000, N)
Gradasi (1500-5000 m/s)	[Model,Eq] = ModelAwal (Model, 1500, 5000, N)
Kotak	<pre> Model.V0 = 500*ones (Model.sz); Model.V0 (14:end,:) = 5000; Model.V0 (35:37, 23:27) = 1500; Eq.m0 = reshape (1./Model.V0, N.j, 1); </pre>

Kasus inversi seismik ini adalah *mixed-determined* yaitu gabungan dari *under-determined* (ada sel yang tidak dilalui *raypath* sama sekali) dan *over-determined* (ada sel yang dilalui lebih dari 1 *raypath*). Sehingga matriks A akan *ill-conditioned* dan mengakibatkan hasil inversi Δm menjadi kurang akurat. Maka digunakanlah parameter *damping* ε agar inversi tidak menjadi terlalu acak. Selain itu digunakan pula fungsi *velsmooth.m* yang diunduh dari *crewes.org* untuk menghaluskan hasil inversi yang kurang baik tadi. Lalu, dilakukan pula pembatasan minimum-maksimum velocity. Cara kerjanya adalah velocity model yang telah diperturbasi, yang nilainya melebihi *Inv.max_vel* dan yang kurang dari *Inv.min_vel* nilainya diubah menjadi non-finite (NaN). Sel-sel yang bernilai NaN ini kemudian di-inter-/ekstra- polasi dengan menggunakan fungsi *inpaintn.m* yang dibuat oleh Garcia (2017).



Gambar 2. 3. Contoh gambar per-iterasi inversi

III. Fitur Tambahan

Terdapat beberapa fitur tambahan untuk mempermudah pengguna dalam menggunakan script ini.

Fitur	Variabel	Nilai	Arti
Display log	Pilih.display_log	0	Tidak ada log yang tertampil di <i>command window</i>
		1	Jika Pilih.IF=1 → Menampilkan Erms dan konvergensi Jika Pilih.IF=2 → Menampilkan keterangan garis setiap peruntukan sel (titik A dan B, sel yang dilalui, teta, dan keterangan)
Display gambar	Pilih.display_gambar	0	Gambar tidak ditampilkan
		1	Jika Pilih.IF=1 → Gambar muncul setiap iterasi inversi Jika Pilih.IF=2 → Raypath digambar setiap <i>receiver</i>
		2	Hanya jika Pilih.IF=2 → Raypath digambar setiap sel
Save gambar (otomatis)	Pilih.SaveGambar	0	Gambar dan log tidak akan disimpan
		1	Gambar dan log akan disimpan
	Pilih.Tempat	(string)	Lokasi folder penyimpanan gambar
Alarm	Pilih.alarm	(string)	Lokasi file untuk alarm penanda bahwa proses <i>running</i> selesai (format *.mp3). Catatan : Untuk menghentikan suara alarm → ketik <code>clear sound</code> pada <i>command window</i> , lalu enter.

Halaman ini sengaja dikosongkan

IV. Daftar Script dan Kegunaannya

Script MATLAB dapat diunduh di <https://github.com/rintabt/SeisTomo-RayFinDiff>

1. Run		
1.	run_seistomo.m	Script untuk di-run.

2. Pembuatan Model		
2.a.	model_3LapHor.m	Membuat model 3 lapis horizontal
2.b.	model_3LapVer.m	Membuat model 3 lapis vertikal
2.c.	model_AnomHigh.m	Membuat model anomali <i>high velocity</i>
2.d.	model_AnomLow.m	Membuat model anomali <i>low velocity</i>
2.e.	model_Hom.m	Membuat model homogen
2.f.	model_kars.m	Membuat model kars

3. Pembuatan <i>source</i> dan <i>receiver</i>		
3.	SR_XHole_L.m	Membuat posisi <i>source</i> dan <i>receiver</i>

4. Plot		
4.a.	plot_Model.m	Plot <i>velocity model</i>
4.b.	plot_SR	Plot <i>source</i> dan <i>receiver</i>
4.c.	plot_TimeForward.m	Plot <i>imagesc travel time</i> hasil <i>forward modelling finite difference</i>
4.d.	plot_KonturWaveFront.m	Plot <i>kontur travel time</i> hasil <i>forward modelling finite difference</i> (hanya jika jumlah sel vertikal dan horizontal sama)
4.e.	plot_GridSel.m	Membuat grid sel (batas-batas sel) per- <i>raypath</i>
4.f.	plot_BandingForward.m	Plot nilai <i>first arrival time</i> masing-masing <i>receiver</i> pada <i>source</i> tertentu (<i>Pilih.IF=2</i>)
4.g.	plot_SelisiForward.m	Plot nilai selisih (mutlak) antara travel time perhitungan finite difference dan <i>raypath</i>

5. Pembuatan Model Awal		
5.	ModelAwal.m	Membuat model awal (gradasi)

6. <i>Looping</i> penelusuran <i>raypath</i>		
6.a.	DefineAllRaypath.m	<i>Looping forward modelling</i> dan pembuatan <i>raypath</i> setiap <i>source</i> dan <i>receiver</i>
6.b.	TracingBack.m	<i>Looping</i> penelusuran <i>raypath</i> dari <i>receiver</i> hingga <i>source</i>

7. Forward modelling dan perhitungan teta

7	eikonal2D_edit.m (diunduh dari crewes.org; diedit)	Forward modelling eikonal finite difference
---	--	---

8. Logika arah raypath

8.a.	Cal_teta.m	Menghitung teta (<i>steepest descent</i>) berdasarkan hasil dari eikonal2D_edit.m
8.b.	sel_titik_a.m dan sel_titik_b.m	Memilih sel ketika titik awal (di receiver) tepat berada di pojok sel gradien
8.c.	sel_sisi.m	Memilih sel ketika titik awal (di receiver) berada di sisi sel gradien
8.d.	sel_tengah.m	Memilih sel ketika titik awal (di receiver) berada di dalam sel gradien
8.d.	raypath.m	Menentukan titik B dan next cell. Berdasarkan tabel logika (Oldenburg, 1993)
8.e	rayline.m	menentukan koordinat sel-sel yang dilalui raypath

9. Smoothing

9.a.	velsmooth.m (diunduh dari crewes.org)	Smoothing model perturbasi dan model yang telah di-perturbasi
9.b.	inpaintn.m (diunduh dari https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27994-inpaint-over-missing-data-in-1-d-2-d-3-d-nd-arrays)	interpolasi/ekstrapolasi sel-sel yang nilai <i>velocity</i> -nya lebih dari Inv.max_vel atau kurang dari Inv.min_vel

10. Save Parameter Inversi

10.	SVM.m	Menyimpan nilai iterasi, Erms, konvergensi, waktu inversi (fungsi internal inversi pinv atau lsqr), serta waktu total per-inversi (termasuk peruntukan raypath serta fungsi internal inversi). Disimpan dalam format *.txt dan *.mat
-----	-------	--

Daftar Pustaka

- Garcia, D. (2017), *Inpaint over missing data in 1-D, 2-D, 3-D,... ND arrays* Diambil dari <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27994-inpaint-over-missing-data-in-1-d-2-d-3-d-nd-arrays?focused=8189785&tab=function>.
- Hogan, C. (2005), *Fast-marching eikonal equation solver following Sethian & Popovici (Geophysics 64 no 2 pp 512-523, 1999)* Diambil dari <https://www.crewes.org/ResearchLinks/FreeSoftware/crewes.zip>.
- Oldenburg, D.W. (1993), "Two-Dimensional Tomographic Inversion With Finite-Difference Traveltimes", *Journal of Seismic Exploration*, Vol.2, hal. 257–274.