

(0 6 . . . 0) C
o o o o C
oo oo
o o o
C
o o o o
oo oo
o (. 0 6)
o
o 0 3) o o (.
o
o
o
o) oo (.
o (. . . 0)
oo o
oo o
(

0

0

0

0

0

$$MSE = \frac{1}{C \times H} \sum_{i=0}^{C-1} \sum_{j=0}^{H-1} (I(i,j) - K(i,j))^2 \quad (1)$$

$$SSIM(I, K) = \frac{(2\mu_I \mu_K + c)(\sigma_{IK} + c)}{(\mu_I^2 + \mu_K^2 + c)(\sigma_I + \sigma_K + c)} \quad (2)$$

(3)

$$SSIM(I, K) = \frac{(\mu_I \mu_K + c)(\sigma_{IK} + c)}{(\mu_I^2 + \mu_K^2 + c)(\sigma_I + \sigma_K + c)} \quad (3)$$

2.4. Brief summary

Mean, Std, SNR, PSNR, SF, G, IE, SSIM

Mean, Std, SNR, PSNR, SF, G, IE, SSIM

IE, SSIM

(0.5)

(0.5)

3, 37

0.5

0.5

o

o

o

o
0 9)

(. 0 9)
(. 0 9)

o

(. 0 8 . 0 9)

006)

(. 006)

(.

0 6

0 6

oo (

0 0)

o o o

o o (009 009)

o

o o o

oo (

005) oo

o o o

o o o

o o o

o o o

(009) oo

o o o

o (0 0) oo

o o o

(000) oo

(0 9)

o o

(979)

o

(009)

o o o

o o o

o o o

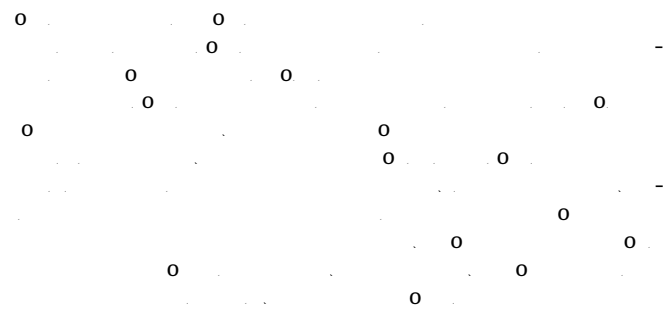
o o o

(C) C - C C-

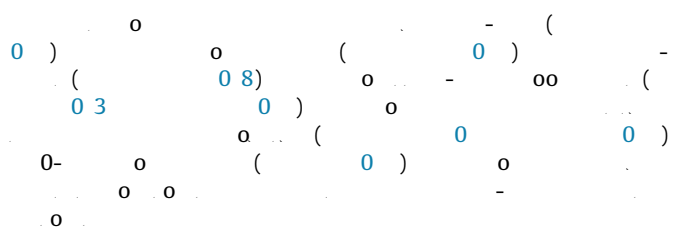
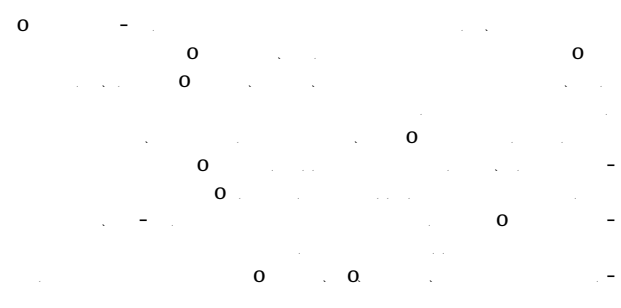
o o o

(98) oo o o

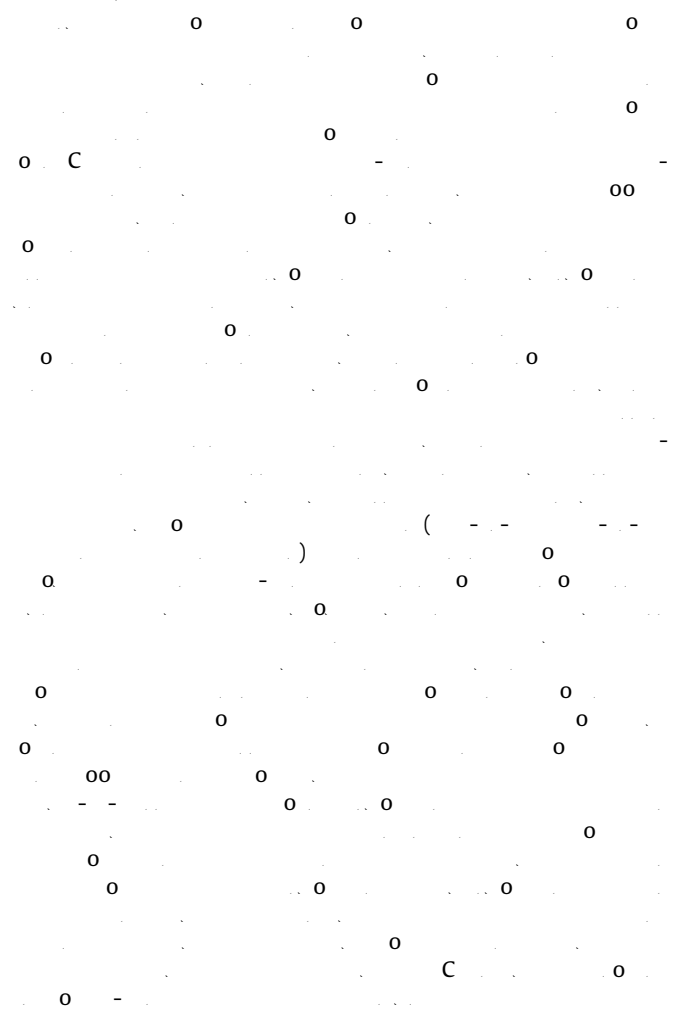
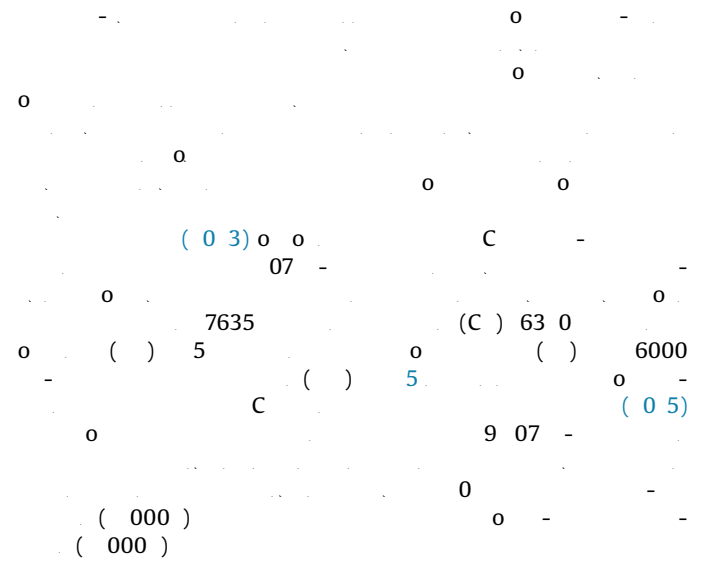
0 -
-
-
-
0 -
-
0
0
0
0
0 (0 8)



3.3. Deep learning-based defect recognition method



3.3.1. Public dataset



0 0 0 0

00 - 0

0 - - (0) 0 0

0 - (0) 0 0 0

0 0 0 0 0 0

00 0 0 (0) 0 0

0 0 - - 0 -

93 67 00 7

C C -

(0) 0 6 50 -

- 00 0 (0 0) 0 9 5

98 97 00 5

C 00 -

(0 0) 0 0

C 0 0 00 -

50 0 (0 0) 6 0

00 50 0 0

(0 0 0) C 0 -

0 0 0

0 3) 0 0 (C 0

50 0 0 0

0 0 (0)

C -

0 0 0 0

0 0 -

3.3.3. Semantic segmentation

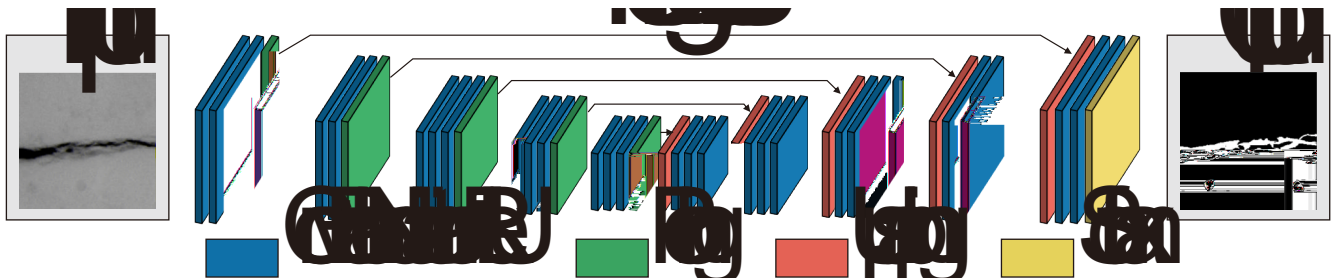


Fig. 8.

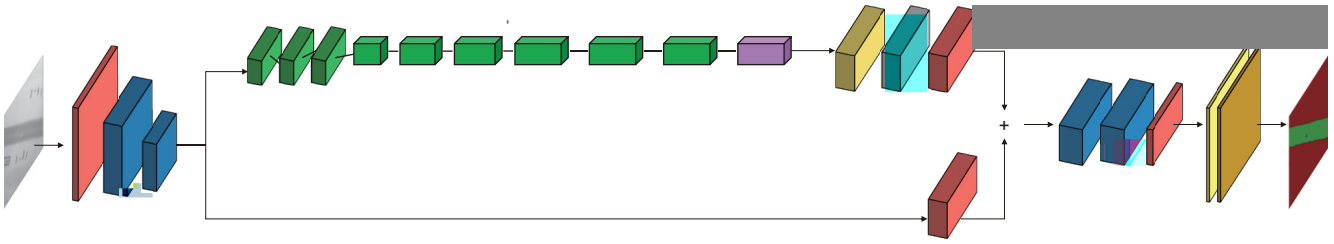


Fig. 9.

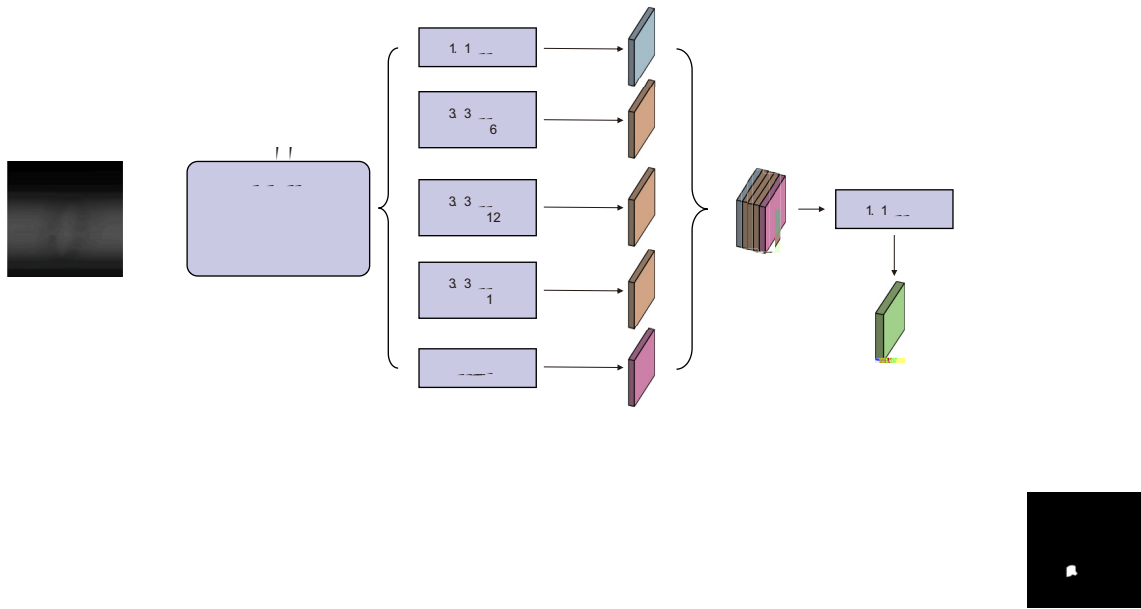


Fig. 10.

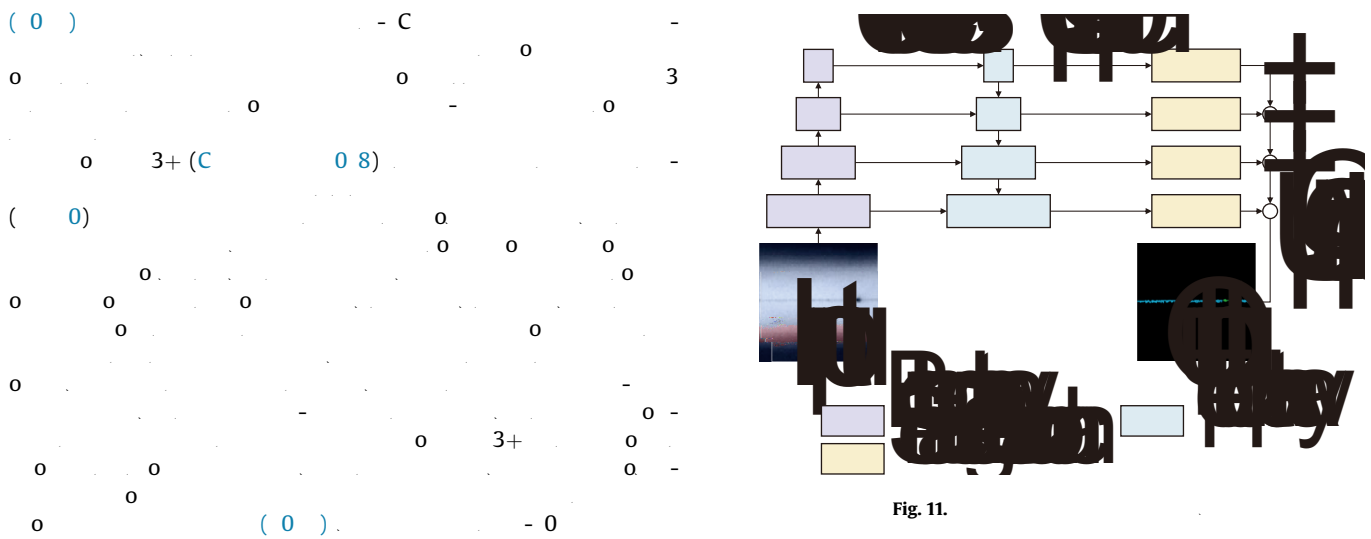


Fig. 11.

C (0 5) (0 0 0 3)

o o o o
- o o o o
o o o o
oo o o
o - o o
(0) o o o o

o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o

oo ()
o o o o C
o o o o
955 o o o o
oo (0 5) o o o o
C o o o o

867 (mIoU)
o o o o
o o o o
o o o o
oo (C 0)
(0 5) o o o o

C o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o
o o o o

(0)
- o o o o (0)
o o o o
8- o o o o
o o o o
(0 3) o o o o
o o o o
o o o o

o o o o -

o o o o -
o o o o -
o o o o -
o 3+ - C o o o -
o o o o -
o o o o -

o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -

o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -

o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -

o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -

o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -
o o o o -

3.3.4. Object detection



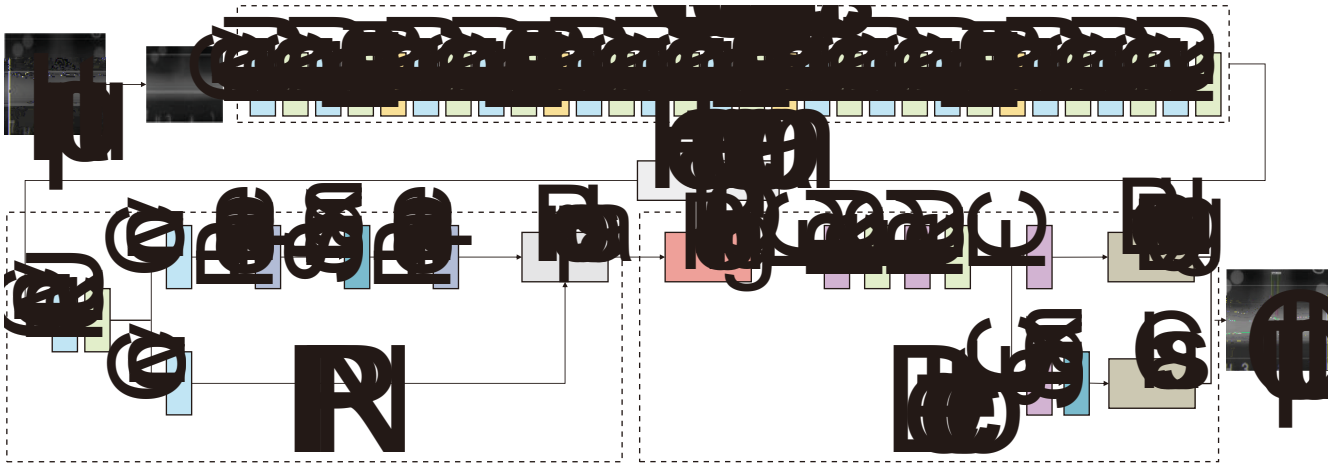


Fig. 13.

-C

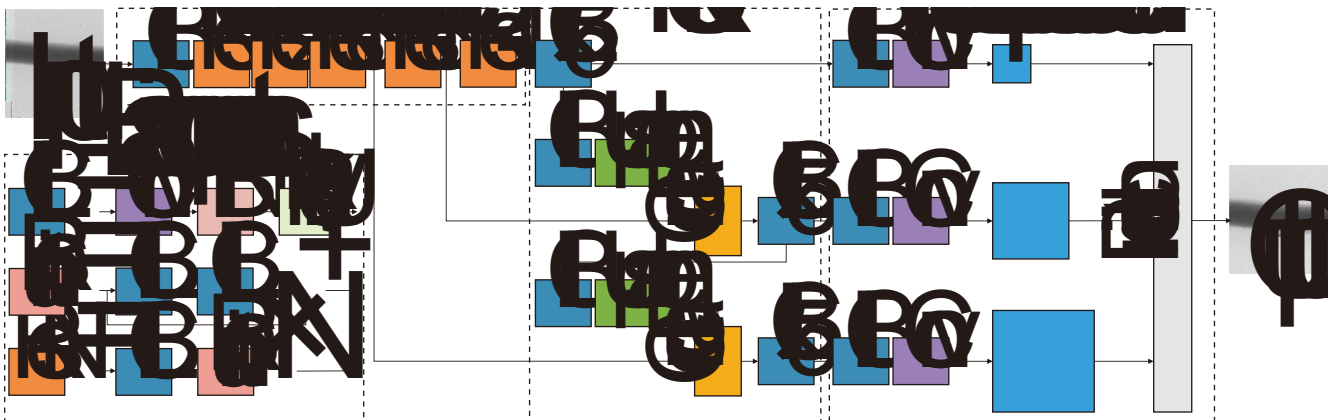
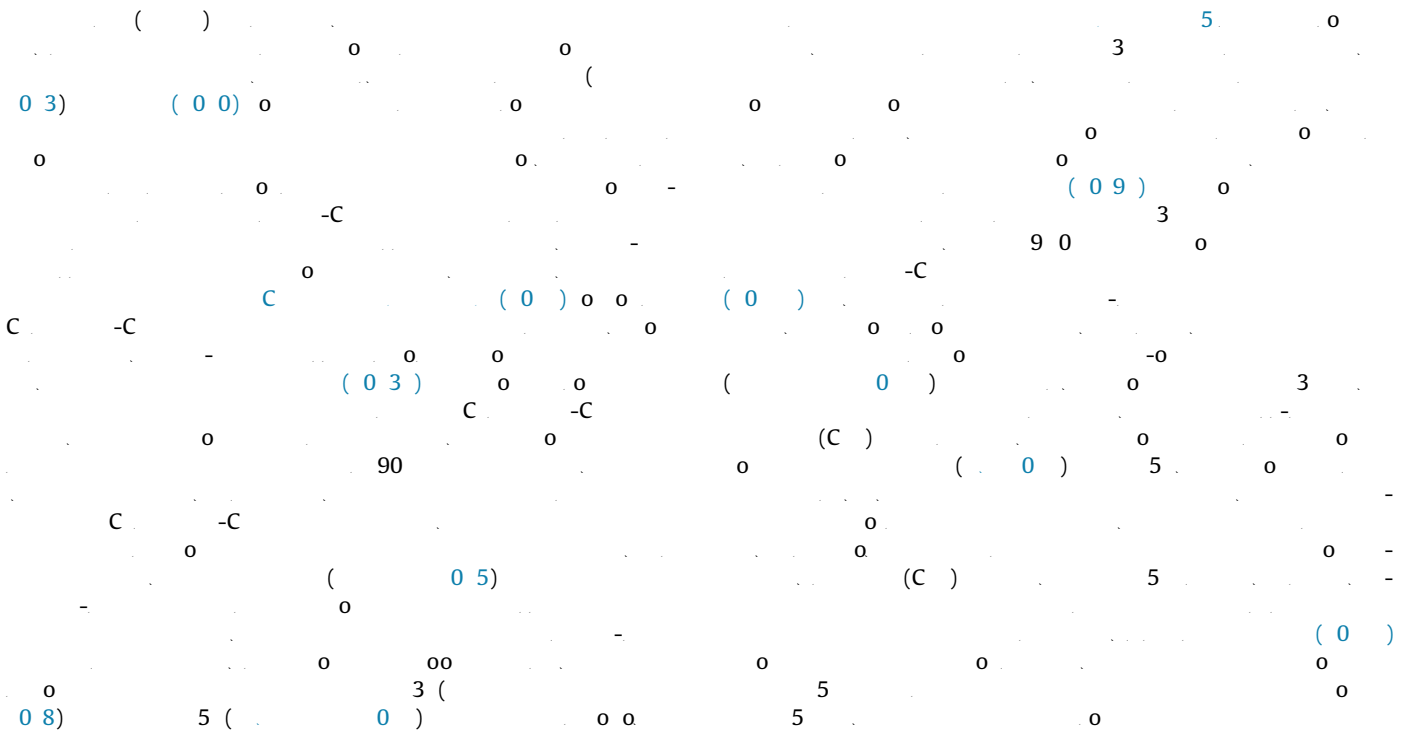


Fig. 14.

3

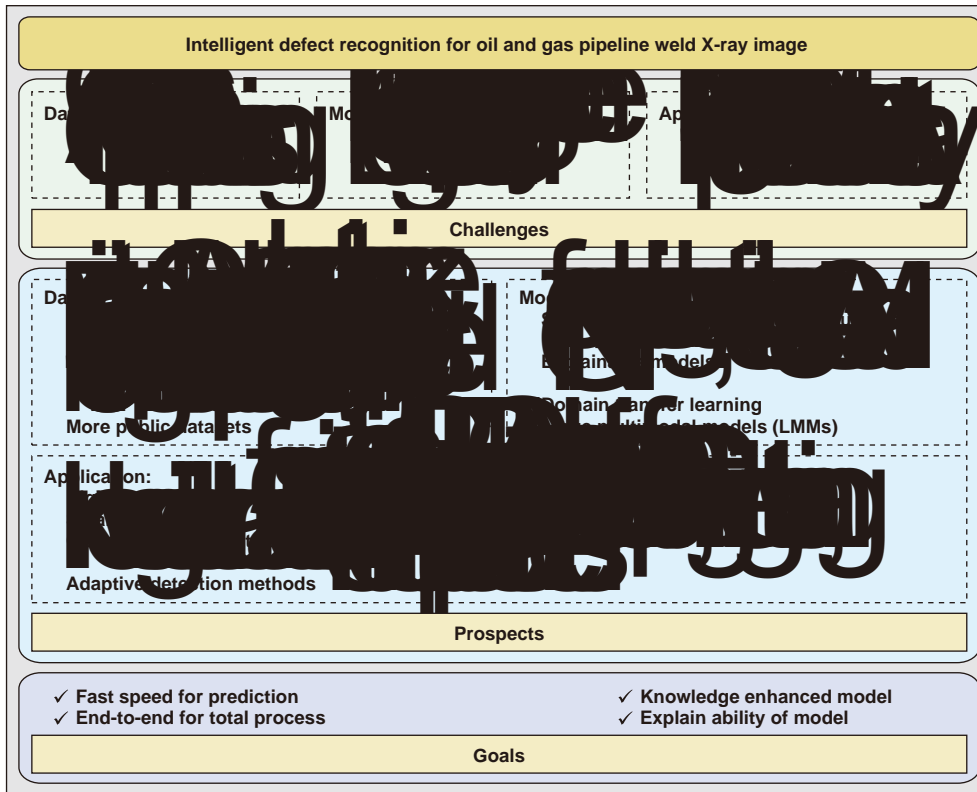


Fig. 16.

4.2. Model perspective

C C 0 9 o
/ 0 073/ 0 905 00 (C) & (08) - +65 o //
C 0 8
o 0 806 036 0 8 (0) 3 8-35 o // / 0 0 6/
C C 0 9 - oo 9 (3)
506 o // / 0 3390/ oo9 3506
C C 0 5 -
o
0 09/ 0 5 355 90 - 5 o // /
0 5 CC - C
/ 0 073/ 0 3 0 00 (C) 6 () - 0 o //
C 0 5 - o o
() 9 3-950 o // / 0 0 9/ - o 0 07 6
009 009 C 8- 55 C a
C 009 5 068 8 o // / 0 09/
0 9
o // / 0 3787/ 000-0976 0 9 0 0 3 (C) 39 () 3- 7
o 9 () 7-30
o // / 0 0 / 0 055 ()
59 9- 5938 o // / 0 09/ CC 0 9 9 7 58
0 5 C
oo 0 5 (3) 3 o //
/ 0 007/ 09 - 0 5-0305-9
oo 0 0 -
C
C () 7- +97 o // / 0 073/ 0 9070300 ()
0
03 0 / 67 -76 9 0 0 0 (C) 36 () 99- 0 o // /
o C a (C) o // o
/C a 8 9669
0 8
o C - oo
(C 0 8) o // / ? = 7 0
0 C o -
6 907 C x o // / ? = 60 8
x

3 3- 357 o // / 0 0 6/ o 0 08 008 9 (5)
 C (CCC) oo -7 o // / 0 09/ CCC 56998 0 3 0306 7
 (9) 6580 o // / 0 0 6/ 0 3 6580
 0 6776938
 C / 0 09/ C 0 6838 3
 C // / 0 09/ C 0 887
 C / 0 09/ CC 0 3093 87
 0 3-0 3 7-3
 C o / 0 09/ o 0 8 0085
 0 3 0 9 9
 o // / 0 038/ 77- 08
 C o 9(5) 6 - 69 o // / 0 0 6/ 0 6 -8856(00)00075-5
 0 6 / 989 5
 - 6 o // / 0 0 6/ 0 9 0 060
 7- 3 o // / 0 007/ 0799-0 8-0 76-8
 0 (3) 36- 0 o // / 0 3969/ 00 -96 0 03 009 ()
 C // / 0 0 6/ 00 -9 7 0 03 063 (C 0 0(3) 63-67)
 C // / 0 3969/ 007-73 0 0 0 6 (C) 60 () 7 -76)
 o 0 3 0 8
 / 0 0 6/ 0 6 08
 0 0 6/ oo 0 08379 33 08379 o // /
 3708 o // / 0 0 6/ 0 3 3708
 / 0 0 6/ o 0 050
 00 -0 5 0 30 0 5 (C) 3 () 7 -8 o // / 0 3969/
 0 6 67 -95 8 0 6 030 0 (C) 0 6 (3) 8 -8 o // / 0 3969/

3 () 55- 58 o // / 0 3969/ 0 58-093 0 0 0 ()
 C // / 0 0 6/ 0
 6 C 0 3
 5 -55+76 o // / 0 38 6/ - 070/ 0 3 0 003 ()
 C // / 0 09/ 7 (5) 5- 3 o // / 0 09/
 0 3389 06 0 9
 0 088/ 7 -6596/ 37/3/03 005 37(3) 03 005 o // /
 oo 365- 370 o // / 0 09/ C 005 6008 8
 9(3) 50- 6 o // / 0 0 6/ o 0 090 6
 oo 0 8550/ 3 0 9070
 0 9
 C // / 0 09/ C 007- 3 0 9 30 ()
 (3) 59-6 +66 o // / 0 3969/ 007- 3 0 9 30 ()
 C // / 0 0 6/ 0 5738 o // / 0 0 6/ 0 5738
 009 o // / 0 0 6/ 008 00
 5 () 69-85 o // o / 0 0 3/
 00000 0076 5653707 999
 / 0 0 6/ 0 65-0 (97)00307- 000
 6 () - 0 o // / 0 0 6/ 00 0-
 0 55(00)000 6-5
 (C) oo 936-9 o // / 0 09/ C 0 7 06
 0 7 o // / 0 09/ CC 0 73 (CC) oo 999-3007
 / 0 9650/ 70 865 (C) 39 () 7- 56 o //
 0 6 o (C) oo
 7 - o // / 0 09/ 0 3 7 609
 oo // / 0 9650/ 0987 (C) 3 () 5 - 6
 0 00050 (C) o // / 0 7 57/
 007 C () (6) 55 -555 o // /
 03969/ 673-3 93 00706 0 7 (C)
 o 3 9- 9 o // / 0 0 6/
 o 0 0908
 C oo 56 0 963 o // / 0 0 6/ 0 3 0 963
 C // / 0 0 77/ 0 0 0 (C)
 0 55-59 o // / 0 0 77/ 0 3
 (9) 9 36-9 6 o // / 0 09/ 0 3 870

0 C - - o
 0 337 0 73 - o // / 0 09/
 C 0
 oo 55 o // / 0 0 6/ 0 0 55 o
 0
 / 0 3390/ 36 9 () 36 9 o //
 0
 o oo () 73 - 7 o // / 0 0 6/
 o 0 0 0 0 C
 C 0 0
 3 (7) 5 -5 + 5 o // / / / / 0 0 0 7 3 (C)
 C)
 0 3 - o
 3 6 0 7358 o // / 0 0 6/ 0 0 7358
 0
 0 973/ 0 0 0 0 5 (C) 6 () - 8 o // /
 0
 7007/ (C) o // / 0
 0 0 99
 0 0 9
 C o 0 0 9 / C C o C
 CC 0 0 9 50 6 9 30 oo oo 857-860 o // / 0 0 9/
 0 0 9 0 0 9 C o C o
 C 0 0 9 50 oo - 5 o // / 0 0 9/
 C 0 7 o
 68 - 6 o // / 0 0 6/ o 0 7 0 5 0
 C 0 3
 o // / 0 9 573/ 0 9 5-0 9 6 0 3 0 0 0 8 (C) - 9
 33 ()
 o C oo 0
 oo -6 o // / 0 0 9/ 0 7
 0 7
 0 7 8 6 6 8 8 3 oo oo 30 -30 6 o // / 0 3 9 9/
 0 0 3
 / 0 7 8 / 5 0 6 7 6 5 9 5 C 5 (0) 6 7 6 -6 8 o //
 0 5
 0 0 0 7/ 0 9 -0 5-0 3 5-7 3 () o // /
 0
 0 0 6/ o 0 3 0 8 0 6 () 5 9 7-6 0 8 o // /
 C
 oo 0 () 7 o //
 / 0 8 6/ 7 5-9 5 - 0- 7
 0 0 5
 0 7 8 / 0 0 5 7 0 6 5 C 7 (0) 6 5-6 3 0 o // /
 0 5
 o o o o 7 o // / 0 0 0 7/
 3 ()
 0 9 -0 5-0 9 0- 0 3 o
 3 () 3- o // / 0 3 0 9 /
 0 3
 0 3
 C 9-3 o // / 0 0 9/
 C 0 3 9 0 C
 (C C) 7 (3) 5 3 7-5 3 o // / 0 3 6 0 / 0 0 3 9 C C
 0 0 0
 5 C oo 5-
 0 0 5 C o - o

0 0 5
 oo 88-93 o // / 0 0 9/
 0 3 - o o
 0 6 8 (9)
 8 5- 8 3 o // / 0 0 0 7/ 0 0 7 0-0 3- 8 5 7-5
 0 0 - o
 o o o
 0 C C
 0 C (C)
 oo 6 - 6 o // / 0 0 9/ C 5 9 3 8 0 9 3 9 6 3 0
 0 6 oo
 C C 0 0
 -C oo 0 (3) 8 6 8 9 o // / 0 3 3 9 0/
 oo 0 3 8 6 9 - o o -
 0 o -
 0 (9) 3 0 5 9 0 o // / 0 0 6/ 0 3 0 5 9 0
 C 0 3
 7- 3 0 o // / 0 3 6 / 0 3 0 8 0 7 (C) 0 3 (8)
 0 0
 0 0 9/ CC 0 0 3 0 0 5 5 0 8 9 9 5 - 9 9 6 0 o // /
 9 9 0 - o
 0 0 9/ 3 5 6 0 5 (7) 6 9-6 3 9 o // /
 o C 0 3 3 5 9-3
 o // / 0 0 6/ 0 0 0 6 9 9 8 C o
 o o () 9 3 o //
 / 0 0 0 7/ 0 3 7 8 0 8 C o 0 9 - C
 o // / 0 8 5 5 0/ 9 0 0 5 0
 C C
 oo 9 0 o // / 0 3 0 5 7/ o 7 5 0 9
 C C 0
 - oo 3 0 3 0 9 o // / 0 0 6/ 0 0 3 0 9
 0 6
 () 7- 0 o // / 0 5 8/ 0 0 -3 8 0 6 0 0 6 (5
 C)
 0 oo
 o // / 0 0 6/ o 0 3 0 0 8 (3) 0 6 6- 0 7 9
 0
 6 0 () 0 5 7- 0 6 5 o // / 0 0 6/
 0
 6 0 5 9 9 o // / 0 0 6/
 0 0 5 9 9
 0 0 7 oo
 5 (3) 7- 5 6 o // / 0 3 3 3/ - 0 0 7-
 oo 7 8
 C 0 0 9 C o 0 0 9 -
 C oo 9 3- 9 7 o // / 0 0 9/ C 0 0 9 5 3 8 &
 0 8 3 o //
 / 0 8 5 5 0/ 8 0 0 7 6 7 C
 C o 5 (9) - 0 o // / 0 5/ 3 7 9 C o C o -
 0 5 C o C o
 oo 3 - o // / 0 0 0 7/ 9 7 8-3-3 9- 5 7 - - 8
 9 9
 6 0 () 5 9- 6 8 o // / 0 0 6/
 0 6 7- 7 8 9 (9) 9 0 - 9 8 6
 - 3 3 (6 0 8 8) 5 3 3-5 3 6 o // / 0 0 3 8/
 - o o 3 3 5 3 3 0
 0 3 o 0 () 8-3 5
 - oo o 0 0 7

0 78 / 007 9 0 578 C 9 (0) 578-58 o // /
000 000
o // / 0 09/C 000 899 3 (C 00C 37 0) oo 8- 5
3 6 3 () 6 o // / 0 3390/
C 003 o oo 689-69 o // /
0 063/ 570 03
37 () 9 - 99 o // / 0 0 6/ 003 0 003
o // / 0 0 6/ 003 0 00
37 () 30 -307 o // / 0 0 6/ 003 0 00
C 0
o // / 0 0 6/ 0 03987 C 03987
0 0 o o
(3) 086- 03 o // / 0 3837/ 0 0 030 0
C 0 09/C 0 6 00637 oo 8 - 8 6 o // /
o // / 0 7 5 / 0 0 00
o // / 0 3788/ 0 0 80 0 (C) 8 () - 50 o //
087- 09 o // / 0 3969/ 000- 093 0 0 (C) 35 ()
o // / 0 09/ 0 5 358336 7 - 3
0 33 9 578 7 (6) 630 -63 o // / 0 09/
C o 69 0 90 o // / 0 0 6/ o 0 5 0 90
0 9- 0 6 o // / 0 09/ 0 35 9 6
C) o // / 0 7 05/ 0 000830 ()
/ 0 3969/ 095- 783 0 3 08 00 (C) 8 (8) 7 7-7 0 o //
C 0 oo 9 5- 9 9 o //
/ 0 09/C 0 6 006 7 oo 9 5- 9 9 o //
6- 0 o // / 0 3873/ 000-9787(0 3)09-0 6-05(C) (9)
0 0 6/ o 0 3 0390 C o 8 0390 o // /
0 3 03836 (C C) 75 (3) 753- 766 o // / 0 3 60 /
C 003 C
o // / 0 0 6/ 003 00 37 (6) 6 - 70
C 3 669-67 +68 996
8856(96)8 9 - (9) 667-683 o // / 0 0 6/0 6 -

C C 0 C 030 9 o // / 0 0 6/
o 0 3 030 9 oo 030 9 o // / 0 0 6/
o 0 0 09790/30 -0 6 0 05
(6) -5 o // / 0 99/ 0 05 0
o (5) 390-39 o // / 0 8 (6) 8 8-8 3
o 0 9 9 -306 o // / 0 0 6/
o 0 08 037
/ 0 3969/ 000-386 0 8 05 0 3 (C) 35 (5) - 6+3 o //
0 9 0 76 3/ C 0 9 00 9 (C) () o // /
006 oo 006 (5) 6 -63 o // /
0 3969/ 67 -6 3 006 05 0 (C) 6 () 5 3-53
o // / 0 3 33/ - 7356
C 0 0 79-83 o // /
/ 0 09/C 0 706 7 9
o 0 oo 55 6 8 o // /
0 0 6/ 0 6 8 C 0 35(3)
303-3 0 o // / 0 6 36/ 0 03 06 8 (C)
(5) 3- 7 o // / 0 3969/ 673-6 9 0 05 060 (C)
C C 0 7 oo 0 7
oo 37 -37 o // / 0 09/C 0 78030899 (C)
-5 o // / 0 5 0/ 57- 97 C o oo 0 ()
330 0 50 006 (C) 55 () -50 o // / 0 0 / 007-
C 0 oo 877-88 o // /
0 595 / C 0 6-9 0 9 (C)
oo 8- 0 C 998 C 98C 36 7)
oo 839-8 6 o // / 0 09/ CC 998 7 08 5 C o
3 3- 7 o // / 0 53375/ 0 3 3 0 C o
/ C o 9 7909 C o o // o
() 6 3-67 o // / 0 007/ 0 9 -0 -0 57- 66
0 3 C
5 (3) 879- 883
780937 () 7606-76 o // / 0 0 6/ 0 00 08

o 009
0 0 6/ 009 0 00 (5) 67- 76 o // /
o 009 C o
oo 8 - 93 o // / 0 007/978-3-6 -0 67-8_3
986
0 09/ 986 76775 -8 () 76-89 o // /
00
0 0 6/ 0963-8695(0)000 5-7 35 (8) 5 9-5 8 o // /
0 5 -
0 5 039 (C) 36 () 39- + 6 o // / 0 0 6/
0 5
- 3 o // / 0 09/ 0 5 356958 o -
0 7 36 (9)
() 3 (5) 96- 0 + 06 o // / 0 3969/
673-06 0 705 0 6 (C)
/ 0 3969/ 000-6656 00 0700 (C) (7) 8 - 85 o //
o // / 0 6 85/ 0 0 0 7 (C) 3 () 3 -3
0 5
o 8-
0 03306 5 03306 o // / 0 0 6/
0 6
5- o // / 0 3969/ 673-06 0 6 0 0 0 (C) 3 ()
/ 0 038/ 598-0 -5679 -9 o () 63 o //
80 o o 9 (5) 399- o // /
0 0 6/ o 0 0 009 005 o 6 (3) 3 - o // /
0 080/093 98 059 008 35
6 07 o // / 0 0 6/ 0 6 07 o oo 95
0 5
o oo 68 6386 o // / 0 0 6/ 0 5 6386
0 3
0 0 6/ 0 0 78 3 0 78 o // /
o 03059 o // / 0 0 6/ 0 03059 3
0 9 oo -
C o // / 0 007/978-3-030- 6766-7_6 oo 53-6
0 3
o 0 30 0 6 0 (5) 3 9 -3 09 o // / 0 0 6/
0 6
- 6+7 o // / 0 3969/ 00 - 38 0 6 0900 (C) 0 6 (9)
0 8
o // / 0 3969/ 673-06 0 8 05 0 7 (C) 33 (5) 3- 9
0 oo
-5+ 0 o // / 0 3969/ 006-798 0 0700 (C) 7 (7)
0 C
(C) o // / 0 76 3/ 0 00 67
0 - o 77 639-65
o // / 0 0 6/ 0 090 6
C 0 8 o
o // / 0 8550/ 808 0 560

0
 / 0 7688/ C 000- 6 6 0 05 6(C 6 (5) 676-68 o //)
 06 5 o // / 0 0 6/ 0
 C 5 0 9
 C () 7- o // / 0 3963/ oo 095-385 0 9 0 00 ()
 0 7 () 69-80 o // / 0 080/
 0589759 0 59 795
 / 0 0 6/ 0 0600 (7) 563-570 o //
 008 0 5 3-5 7 o // /
 0 0 8/0-878 9- 70-75 3
 0 0 6/ 0 005 0 3 57 6-35 o // /
 o 0 0 09 oo 38 (7) 88 -88 o // / 0 0 6/
 0 8 o
 99 () 683-69 o // / 0 007/ 00 70-0 8- 9-6
 C 0
 / 0 0 6/ o 0 0 0 6 () 7 3- 733 o //
 C 0 3 38 0 899 o //
 / 0 0 6/ 0 3 0 899
 C 0 3 o
 8 () 550-560 o // / 0 0 6/ o 0 3 05 0 3
 o oo
 () 77 -788 o // / 0 0 6/ o 0 09 0 oo oo 9
 0 7 C C o 30 () 08- 09 o // / 0 3969/
 00 - 8 0 70 0 7(C)
 0 7 o C o (C)
 o // / 0 3969/ o 007- 3 0 00 9 0 (C) 0 98- 0
 C 0 9
 0 0 9/ -o 0 8 58 0 3 (3) 6 7- 658 o // /
 0 & 0 (3)
 6-3 o // / 0 073/ 0 0003 (C)
 0 C 89
 () 0 07 o // / 0 088/ 7 -6596/ 89 / 0 07
 0 3 oo
 0 () 00- 6 o // / 0 0 6/ o 0 007
 0 5 o 5 () 3305 o // /
 0 038/ 598-0 5-068 -
 C 39 (6) 5- 9 o // / 0 73/
 0 06 007 (C)
 0
 5-5 o // / 0 060/ 000-7 0 0 0 08 (C) ()
 C o // / 0 7 70/
 0 000885 (C)
 C 0
 () (5) - 8 o // / 0 3969/ 673-
 3 93 0 05 009 (C)
 003
 0 3969/ 000-3 8 003 70 0 (C) 003 (7) - 3+ 8 o // /