



3D Reconstruction of Human Motion Through Video

Thomas Keemon

Advisor: Professor Hao Jiang

2010 Undergraduate Honors Thesis

Computer Science Department, Boston College

1. Introduction

!

W, 15\$!20(!)(%' 15%'0\$!5\$-!5/%'0\$!3)/0:\$%'0\$!53)!%+0!4)3. !;53:)!53)5(!0>!3)()53/&!+ '%&'\$!
 %&!)!-0 1 5'\$!0>! /0 1 2, %)3!4>('0\$8!!W, 15\$(!20(((!5\$!, \$/5\$\$. !5A';% . !%O!A0%&!-)%)/%!5\$-!3)/0:\$'F)!
 -'>>)3)\$%!&, 15\$!20(!!5\$-!>03 1 (!0>! 1 0%'0\$*!&0+)4)3*!%35'\$ '\$: !5!/0 1 2, %)3!%0!-0!%&!)!(5 1)!%&'\$:'!(
 \$0%!(, /&!5!%3'4'5;!%5(@8!
 ! 9&!>'3(%!2)3(O\$!%O!A3'\$: !%&

! #>!%&!A35'\$!20(())(!%&'!(2)/'5;!1)%&0-!>03!3)/0:\$'F\$:!A'0;0:'/5;!10%'0\$*!+&.!&5!(5!
/012,%)3!\$0%A))\$!,()-!%0!3)2;'!5%!'!%_!!9&!5\$(+!)3!'(A)/5,())!%&!,\$-)3;.'\$:!1)/&5\$'(1!>03!%&!)
(.%)1!'(!\$0%/012;)%);.!,,\$-)3(%00-8!!9&!A35'\$!'%(!);>!/5\$!A)!;00@)-!5%!5!(5!'A;5/@!A0<8a!!
]<2)3'1)\$%(!/5\$!A)!3,\$!0\$!5!&,15\$!(,AB)/%!+&)3)!%&!4'(;,5;!(!%'1,;,(!())\$%!%0!%&!)!A35'\$!'(!
/0\$%30;)-!5\$-!%&!)3(,;% '\$:!(,AB)/%!3)(20\$(!/5\$!A)!0A(34)-*!&0+)4)3*!%&!)5/%,5;!(!%)2('!'\$!%&!)
\$),35;!25%&+5.!)3)(20\$('A;!)>03!%35\$(>031'\$:%&!)!\$2,%!%0!%&!)0,%2,%!3)(20\$(!)3)15'\$!,\$@\$0+\$8!!!
! ^)/5,())!5!/012,%)3!15@)!(,/&!5!2003!&,15\$!A35'\$*!230A;)1!(0;4'\$:%&5!,%';'F)(!5!
/012,%)3!0>%!)\$!3;)'(!0\$!/012,%5%'0\$5;,.!'\$%)\$('4)!522305/&)(8!!J301!%&'!(03%!0>!/012,%5%'0\$5;!
(%5\$-20'\$%*!%&!)&,15\$!A0-.!/5\$!A)!%&0,:&!0>!5(!5!3))!(%3,/%,3)8!!?'%&!%&'(!@\$-!0>!)2'/%'0\$*!'%!'(!
)5(.!%0!())!&0+!%&!)<%3)1%'')(!53)!3;5%)-!A5/@!%0!%&!)%03(0!b%&!)!300%c!5\$-!&0+!%&!)!104)1)\$%!
5\$-!35\$:)!0>!10%'0\$!0>!%&!)<%3)1%'')(!53)!/0\$(%35'\$)-!A. !%&!)!\$%)31)-'5%!B0'\$%(!b%&!)
'\$%)31)-'5%!\$0-)(c8!!!
! !K())53/&'!\$!%&!)53)5!0>!&,15\$!20(())(%'15%'0\$!&5(!A))\$!522305/&)-!>301!15\$.!->>)3)\$%!
5\$;:)(!'\$!5\$!5%%)12%!%0!15@)!5!30A,(%!5\$-!5//,35%)(.%)18!!9&)3)!53)!%+0!253(!%0!%&!)!230A;)1!0>!
&,15\$!20(())(%'15%'0\$8!!9&!)>3(%!'(!>'\$- '\$:!5!20(!'!\$5\$!'15:)8!!M!/0,2;!)0>!522305/&)(!%0!%&'(!
230A;)1!\$!%;,-)!,('\$:!A5/@:30,\$-!(,A%35/%'0\$*!%)12;5%!)15%/&'\$:!YQZ!03!-)%)/%'\$:!10%'0\$!'!\$5!
4'-)0!(=,)\$/)8!!9&!)(!)/0\$-!253!0>!%&!)!230A;)1!\$40;4)(!15%&15%'/5;,.!-)(/3'A'\$:%&!)!20(8!!
9&'(!&5(!A))\$!-0\$)!+'%&!A0%&!%3)!5\$-!\$0\$d%3))!YSZ!(%3,/%,3)(8!!!
! 9&)(51)!%+0!230A;)1(!)<'(%!'\$!%&!)53)5!0>!&,15\$!5/%'0\$!3)/0:\$%'0\$8!!7)%)/%'\$:!5/%'0\$!
/5\$!%5@)!%&!)>031!0>!)-%)/%'\$:!104)1)\$%!'\$!(=,)\$%5;!>351)(*!>'\$- '\$:!10%'0\$!-)(/3'2%03(!YRZ!*03!
(01)!>031!0>!%)12;5%!)15%/&'\$:!YG6Z8!!K)/0:\$'F\$:!5/%'0\$(*!0\$!%&!)0%&!)3!&5\$-*!0>%)\$!,())!(01)!
(03%!0>!230A5A';'(%'/!522305/&*!%&!)!10(%!/0110\$!A)'\$:!D53@04!/!&5\$(!YG*!"*G"Z!03!(01)!103)!
/012;)<!^5.)(5\$!A5(-)!(.%)1!Y6Z8!

2. Overview!

! 9&'(!%&)(!>0/ , ()(!0\$!:))\$)35%'\$: !5!67!(%'/@!>': , 3)!>30 1!) '%&)3!5!('\$:;)!(%';;' 1 5:)!03!5!
 (=,)\$/)!0>!>35 1)(!>30 1 !5!4' -)08!!I)/%'0\$!6!-)%5';(!&0+!5!67!20()!'(!:)\$)35%) -!>30 1 !5!('\$:;)!(%';;
 ' 1 5:)*!+&');!()/'0\$!P!(&0+(!&0+! 1 , ;%'2;)!67!20()(!53)!(%3, \$: !0:)%&)3!'\$%0!5!/0&3)\$%5/'0\$8!
 I)/%'0\$!Q!(&0+(!%&!3)(, ;%(!>30 1 !A0%&!%&)!('\$:;)!>35 1)!5\$-! 1 , ;%'2;)!>35 1)!3)/0\$(%3, /%'0\$(8!!
 J'\$5;;. *()/'0\$!R!-) 1 0\$(%35%)(!5!\$, 1 A)3!0>!- '>>)3)\$%!522;'/5%'0\$(!>03!%&'(!(. (%) 1 *!3);5%) -!+03@!'\$!
 %&!>');- *!5\$- !>, %, 3)!+03@8!

3. Single Frame Reconstruction

!

K)/0\$(%3,/%'\$:!5!67!20(!>30 1 !5\$!' 15:)! '\$40;4)(!%&3))!(%)2(e!

G8 C0;;)/%'\$!:,()3!'\$2, %!

"8 L)\$)35%'\$:!5;;!20(('A;)!20(!

68 J'\$- '\$: !%&! 1 0(!; '@; . !20(!

3.1 Collecting user input

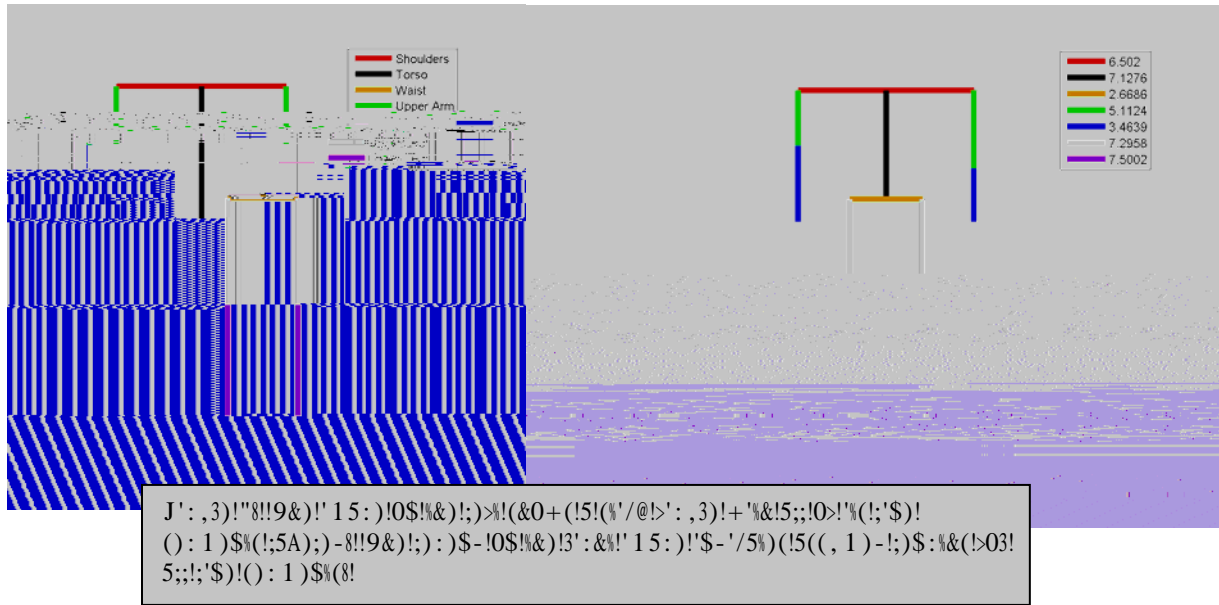
9&!>3(%!(%)2!' \$!%&!230/)((!' \$40;4)(!%&! , ()3! 1 53@ '\$: !%&!BO'\$%(!0>!%&!2)3(0\$!' \$!%&!2304' -)- !

' 15:)8!!L'4)\$!5\$!'\$2, %!' 15:)*!%&! , ()3! /; /@(!0\$!%&!)(!&0 , ; -)3*!);AO+*!5\$- !+3'(%!>03!AO%&!53 1 (*!5(!

+);;!5(!%&!)&'2*!@\$)) *!5\$- !5\$@;)!>03!AO%&!;) : (8!# \$!%0%5;*!G" !BO'\$%(!53)!\$))-)8!#>!5\$. !0>!%&!)BO'\$%(!

53)!\$0%4('A;)!' \$!%&! ' 15:)*!%&! , ()3! 1 , (%! : '4)!5(! /; 0!)!5\$!52230<' 1 5%'0\$!5(!20(('A;)8!!M(!5!3)(, ; %!

0>!%&! /0;;)/%) -!20'\$\$(*!5!(% /@!> : , 3)!(! :)\$)35%) -!+ '%&!GG!;' \$)!(: 1)\$%(8!!



3.2 Generating all possible poses

#\$! 1 5%&) 1 5%'/5;!)3 1 (*!5!230B)/%'0\$!'(!->)\$) -!5(!%&)! 1 522'\$: !0>!5!(%)%10>!20'\$\$(!5\$- !; '\$) (!>30 1 !0\$)!2;5\$)!%0!5\$0%&)38!! ? '%&'\$!%&)!(/02)!0>!%&'(!230B)/%*!%&! :)\$)35%) -!(%'/@!>' : ,3)!/5\$!A)!
 ()\$!5(!5!230B)/%'0\$!>30 1 !5!6 7!2;5\$)!%0!5!" 7!2;5\$)8!!9&'(!% . 2)!0>!230B)/%'0\$!'(!/&535/%)3'F) -!A . !5!
 ;0((!0>!)2%&'!\$>03 1 5%'0\$8!!] (()\$%'5; . *!5; ;!67!20'\$\$(!b f * g *hc!'\$!%&)! (. (%) 1 !A)/0 1)!b f * g c8!!

M\$!)5(. !+5 . !0>!%&'\$@\$: !5A0 , %!5!6 7!%0!" 7!230B)/%'0\$!'(!%0!2'/% , 3)! (0 1)0\$)!(&'\$' : !5!
 >;5(&' : &%!5 : 5'\$(%!5!>;5%!+5;;8!!#>!5\$!'\$ - '4' - , 5; !+)3)!%0!2;5/) !&'(!&5\$- ! 1 '- +5 . !A)%+))\$!%&)!
 >;5(&' : &%!5\$- !%&)!+5;;*!%&)!&5\$- !+0 , ; -!/5(%!5!(&5-0+8!!#%&'(!% , 5%'0\$!%&)!&5\$- !(!5\$!0AB)/%!'\$!5!
 67!)\$4'30\$ 1)\$%!5\$- !%&)!(&5-0+!'(!%&!230B)/%'0\$!0>!%&)!&5\$- !0\$%0!5!" 7!2;5\$)8!!L'4)\$!%&'(!() , 2*!
 '%!'(!)5(. !%0!' 1 5 : '\$)!&0+!) '%&)3! 1 04'\$: !03!30%5'\$: ! . 0 , 3!&5\$- !+0 , ; -!/ &5\$:)!%&)!(&52)!0>!%&)!
 (&5-0+!5 : 5'\$(%!%&)!+5;;8!

! E('\$: !%&'(!;0 : '*/!/0\$('-)3!5!;\$)'\$!6!- ' 1)\$('0\$!(+ '%&!%&)!20'\$\$(!b<_G*! . _G*!F_Gc!5\$- !b<_*! . *_!F_*c!
 5\$- !%(!230B)/%'0\$!0\$%0!5!" 7!2;5\$)!+ '%&!20'\$\$(!b<_G*! . _Gc!5\$- !b<_*! . *_c8!!C5;/ , ;5%'\$: !%&)!- '(%5\$/)!

! O00@\$:!A5/@!5%!(%)!('!/@!>':,3)*!(%)!:05;!('!0!/5;/,;5%)!(01)!(03%!0>|-)2%&! '\$>0315%'0\$8!!

9&'(!/0,;-!A)!-0\$)!,%;'F'\$:!) =,5%'0\$!6*!&0+)4)3*!(%)3)!53)!(<'%;!%+0!,@\$0+\$0!(8!9&'(!'(!

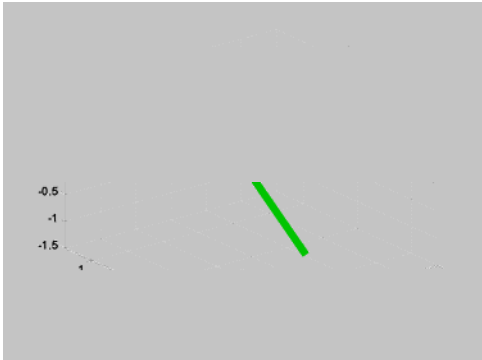
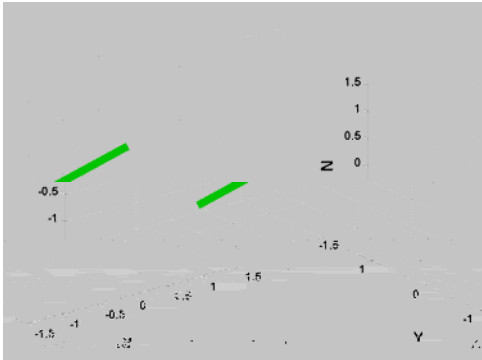
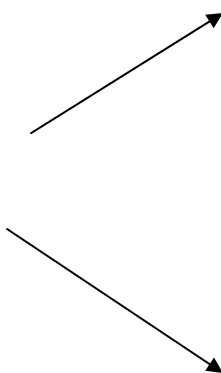
04)3/01)!A.!'<'\$:!%&!45;,)0>! >03!5;;!;'\$)!(:1)\$%(! '\$!%&!(!'!/@!>':,3)!bJ':,3)! "c8!!I0;4'\$:!

) =,5%'0\$!6!>03! !. ');-(e!!

! ! $|\sqrt{6} " 4 " "$! ! ! ! ! ! ! ! bPc!

W54'\$:!(%)!);)\$:%&!&0+)4)3*!-0)(\$0%!/012;)%);.!(0;4)!%&!230A;)18!!9&)3)!('!(<'%;!5!230A;)1!0>!

%&!;'\$)!(:1)\$%[(!03')\$5%'0\$!0\$!%&!h!5<'(8!9&'(!'(!&0+\$!:352&'/5;;..! '\$!>':,3)!68!



J': ,3)!68!9&); '\$)! : 352&)-!0\$!%&!);>!3)23)()\$%(!5!230B)/%'0\$!>301!5!6!-'1)\$('0\$5;!(25/)!'0!%&! f g!2;5\$)8!!9&)!

)\$-!20'\$%(!0>!%&'(!;'\$)!53)!bV*dGc!5\$-!bV*dGc!!9&!230A;)1!+ '%&!03')\$5%'0\$!0\$!%&!hd5<'(!'(!-)1 0\$(%35%)-!&)3)!

A)/5, (!)'%&)3!0>!%&!%+0!;'\$)!(0\$!%&!3':&! /0,;-!A)!, (-!%0!/3)5%)!%&!230B)/%'0\$!0\$!%&!);>8!!9&); '\$)!0\$!%&!%02!

3': &! : 352&!&5(!)\$-!20'\$%(!bV*dGc!5\$-!bV*dGc*Gc!*+&';)%&!;'\$)!0\$!%&!!AO%%01!3': &! : 352&!&5(!20'\$%(!bV*dGc!5\$-!

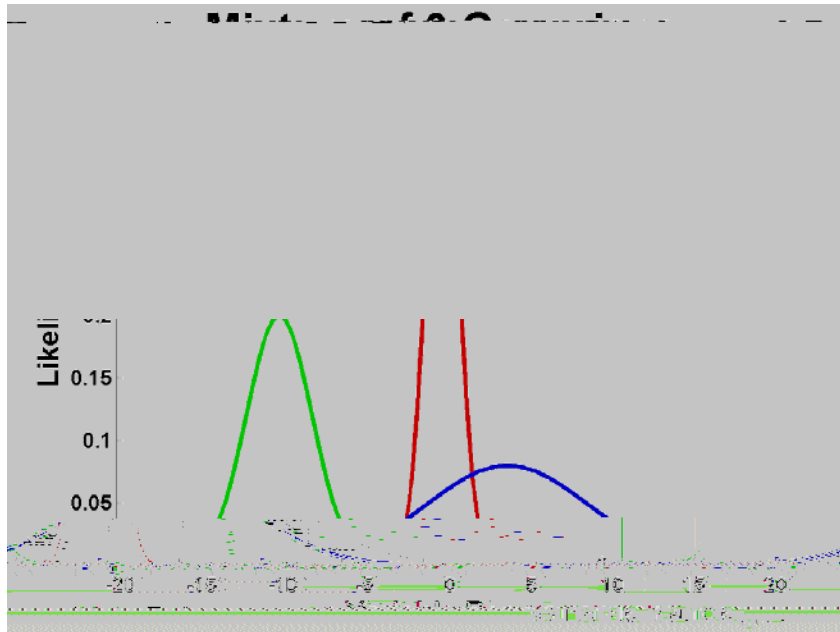
bV*dGc!

L'4)\$!%&5%!%&3)!53)!GG!;\$)!(: 1)\$%(!'\$!%&)!(%!/@!>: ,3)!5\$-!%+0!20((!A;)!0;,%'0\$(!>03!)5/&!
 (: 1)\$%*!%&3)!53)!5!%0%5;!0>!"VPT!20((!A;)!6 7 !20(!/0\$>': ,35%'0\$(8!

3.3 Finding the most likely pose

M>%3!5;:;"VPT!20((!A;)!20(!53)!:)35%)-*!5!1)%&0-!('\$))--!'\$!03-3!%0!-)%)3 1 '\$)!
 +&'&!/0\$>': ,35%'0\$!(! 1 0(%!;'@);. !%0!0// ,38!!9&'(!+5(!5//0 1 2;'(&)-!%&30, :&!%&!), (!)0>!5!
 L5, (('5\$! 1 '<% ,3)! 1 0-);8!!M!L5, (('5\$! 1 '<% ,3)! 1 0-);!(!5!/0;)/%'0\$!0>!0 1)!\$, 1 A)3!0>!L5, (('5\$!
 >,\$/%'0\$(!'\$!5!><)-!\$, 1 A)3!0>!' 1)\$('0\$(8!!!

!



J': ,3)!P8!9&!5A04)!:352&!-)2'/%(!5!/0;)/%'0\$!0>!6!L5, (('5\$!
 -'(%3'A,%'0\$(!'\$!0\$)-' 1)\$('0\$! 1 5@'\$:!, 2!5!L5, (('5\$! 1 '<% ,3)! 1 0-);8!

!

L'4)\$!5\$. !20'\$%! '\$!0\$)!-' 1)\$('0\$*!%&!5A04)! 1 0-);!/5\$!\$, 1)3'/5;;. !-)>')!&0+!;'@);. !%&5%!20'\$%!
 '(!%0!0// ,3!'\$!%&! 1 '<% ,3)!%&30, :&!5!230A5A';% .!-)\$(% .!>,\$/%'0\$!b2->c8!!9&'(!5 1)!>35 1)!0>!;0: '!/
 '(!522;')-!%0!-)(/3'A'\$: !&0+!;'@);. !5!&, 1 5\$!20(!'(!8!!!

#5!03-)3!%0!/3)5%)!5!L5, (('5\$! 1 '<% ,3)! 1 0-);!>03!%&'(!230B)/%*!5!;53:)!-5%5A5()!+5(!
 \$)/)((53.8!!C53\$):')!D);0\$!E\$'4)3('%.[(!D0%'0\$!C52%,3)!75%5A5()!bD0C52c!'(!5!-5%5A5()!>';;)-!
 + '%&! 1 ';;'0\$(!0>!)<5 1 2;)(!0>!&, 1 5\$!20()(!230:35 1 1 5%/5;;. !3)/03-)-!, ('\$:!(2)!'5;!/5 1)35(!5\$-!
 %35/@'\$: !-0%(!YGQZ8!!9&'(!-5%5A5()!()34) -!5(!%&!)(0,3/)!0>!%&!-5%5!>03!%&!L5, (('5\$! 1 '<% ,3)!
 1 0-);8!!#\$!03-)3!%0!/3)5%)!%&! 1 0-);*!%&!20()(!+)3)!>'3(%!)<%35/%)-!>30 1 !%&!-5%5A5()!5(!G"!
);) 1)\$%4)/%03(8!!9&!4)/%03(!+)3)!%&)\$!/, (%)3) -!'5!5G" 7!(,A(25/)! , ('\$: !%&!)<2)/%5%'0\$d
 1 5<' 1 'F5%'0\$!b] Dc!5;:03'%& 1 8!!9&!5;:03'%& 1 !. ');;-)!)(%' 1 5%)(!>03! !b 1)5\$c!5\$-! !b(%5\$-53-!

4. Multiple Frame Reconstruction

L)\$35%\$: !5!67!20(!>30 1 !5!4' -)0!(=,)\$/)! 1 '3303(!%&!230/) - ,3)!>03!%&!('\$:;)!>35 1)!
 3)/0\$(%3, /%'0\$!+ '%&!0\$)!/54)5%8!!9&!03-)3)-!(=,)\$/)!0>!4' -)0!>35 1)(!5--(!5!) 1 2035;15(2)/%!0!
 %&!(!. (% 1 8!!^)/5, (!0>!%&'(*!5!:)\$)35%) -!20(!1 , (%!\$0%!0\$; . !A)!; '@); . !'\$!'%(!0+\$!3): 53- *!A, %! 1 , (%!
 5;(0!A)!3);5%) - !%0!%&!20(!%&5%!0// , 3!A)>03)!5\$-!5>%3!'!\$!%&!(!=,)\$/)8!!9&'(!)((%)\$%5;; . !% , 3\$(!
 1 , ;%'2;)!>35 1)!3)/0\$(%3, /%'0\$!'\$%0!5!: 352&!230A;) 1 8!

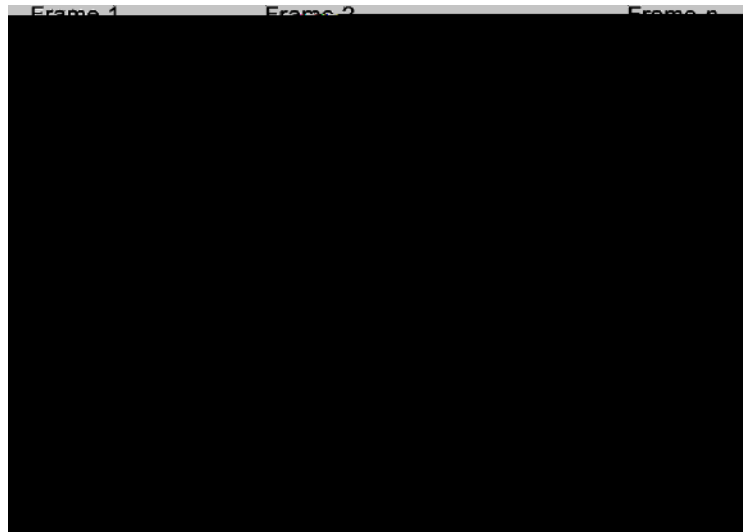
4.1 Travel Cost

X, (%!5(!'\$!%&!('\$:;)!>35 1)!3)/0\$(%3, /%'0\$*!,)3!'\$2, %!'(!3)=, '3)-!%0!;5A);!%&!B0'\$%(!'\$!5;;!
 >35 1)(!0>!%&!4' -)0!(=,)\$/)8!!M;;!20(('A)!20(!/0\$>' : , 35%'0\$(!53)!%&!)\$!:)\$)35%) -!>03!)5/&!>35 1)!
 5\$-!=, 5\$%'>') -!+ '%&!5!2->8!!9&3)!53)!%+0!/0\$- '%0\$(!%&5!\$) - !%0!A)! 1)%!'\$!03-)3!%0!:)\$)35%)!5\$!
 5// , 35%)!20(!(!=,)\$/)8!!J'3(%!0>!5;;*!%&!2->!0>!%&!20(!1 , (%!A)! 1 5<' 1 'F)-*!'\$- '/5%'\$: !%&5!%&!)!
 20(!(!; '@); . !%0!0// , 3!'\$!%&!>'3(%!2;5/)8!!I)/0\$- *!20(!('\$!5!(=,)\$/)! 1 , (%!A)!3);5%'4); . !/;0(!%0!
 0\$)!5\$0%&)3!'\$!%)3 1 (!0>!(01)!- '(%5\$/)! 1)%3'/8!!#)\$!>>)/%*!%&! : 05;!'(!%0!>'\$-! 1 5@)!5!(3')(!0>!>35 1)!
 %0!>35 1)!/0\$)/%'0\$(!%&5!(5%'(> . !%&!>0;;0+'\$: !)=, 5%'0\$8!!9&!%354);!/0(%!%0!: 0!>30 1 !20(! 0>!
 >35 1)! !%0!20(! 0>!>35 1)! !'(!->'\$) -!A.e!

| b 4G* * c4ζ 4G* ! ! ! ! bQc!

4.2 Dynamic Programming !!

9&'(!('% ,5%'0\$!-) (/3'A)(15!;53:!)!/0\$\$)/%)-!:352&!230A;) 1 8!!!



J' : ,3)!Q8!!9&! :352&!-)2'/%)-!&)3)!3)23()\$(!&!)!/0\$\$)/%'0\$(!0>!"VPT!& , 1 5\$!
 20(!/0\$>' : ,35%'0\$(15/30(! >35 1)(8!

!

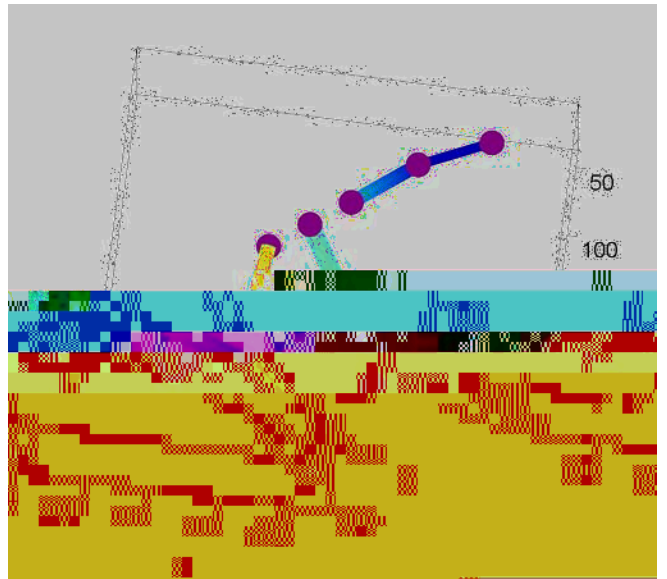
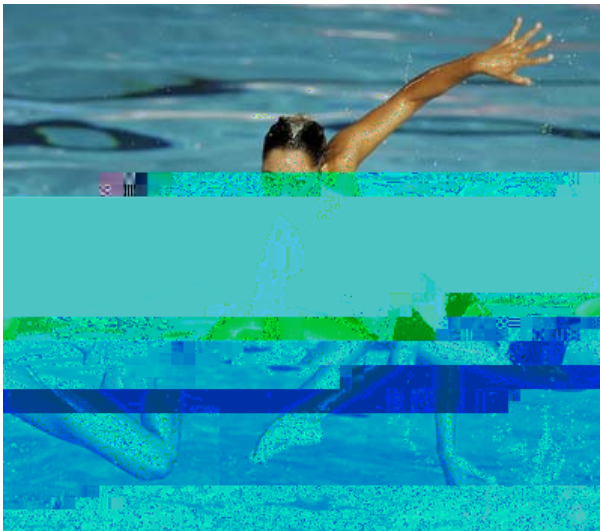
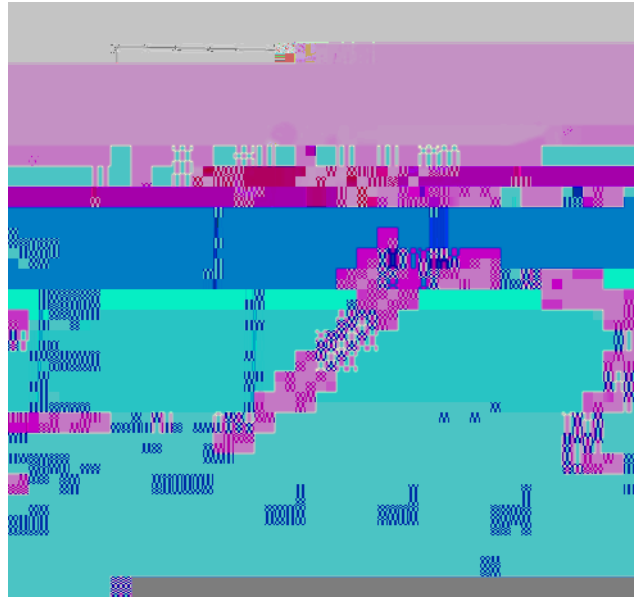
L'4)\$!&5%!5!4' -)0!(=,)\$)/(!5\$!)</)-!GVV!>35 1)(*!&,\$-3)-(!0>1 1 ';;'0\$(!0>!/0 1 2, %5%'0\$(!53)!
 \$))-)-8!!9&'(!.2)!0>!;53:!)!/0 1 2, %5%'0\$!(!02%' 1 'F)-!, ('\$:- . \$5 1 '/!230:35 1 1 '\$:8!!E('\$:!
)=,5%'0\$!Q*!\$54':5%'\$:!&!)! :352&!/5\$!A)! 1 5%&) 1 5%'/5;;. !3)23()\$(%) -!5(e!

! * | 53: 1 '\$b b 4G* * c4 ζ 4G 2 4G c! ! bRc!

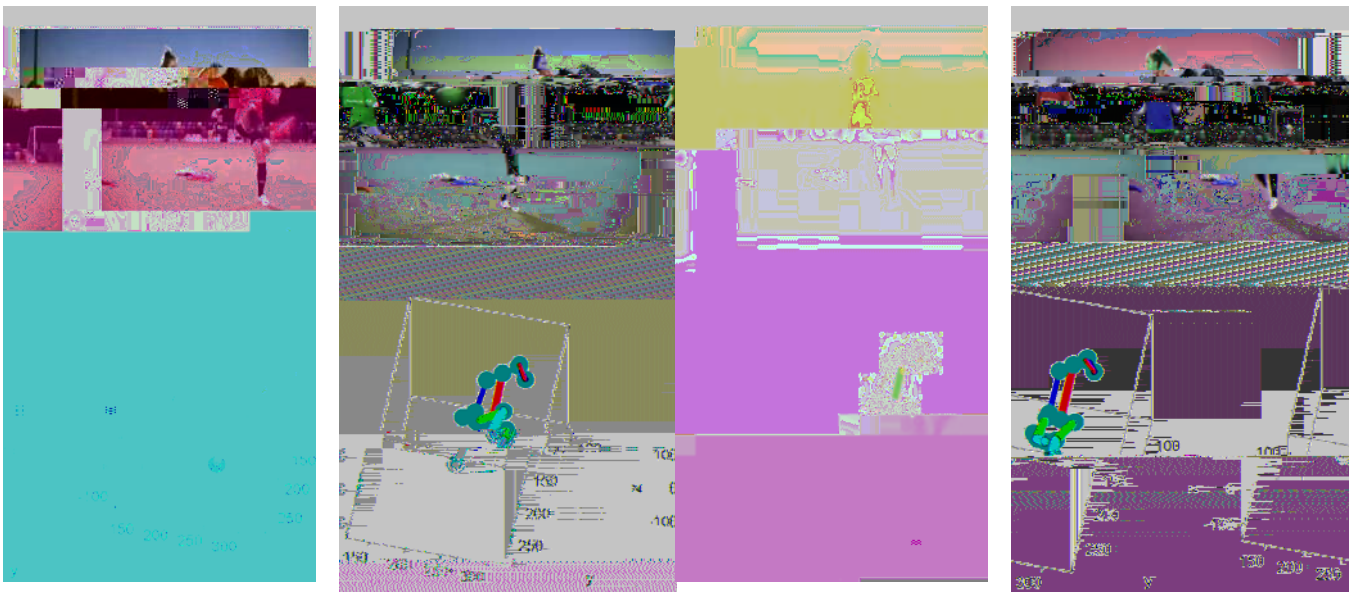
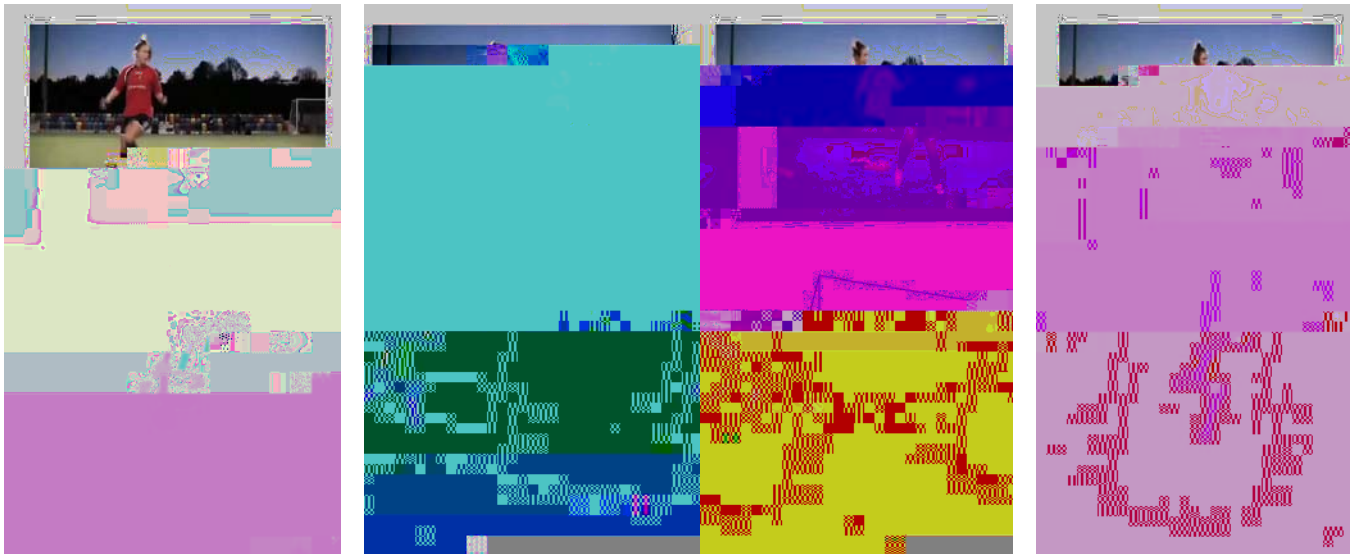
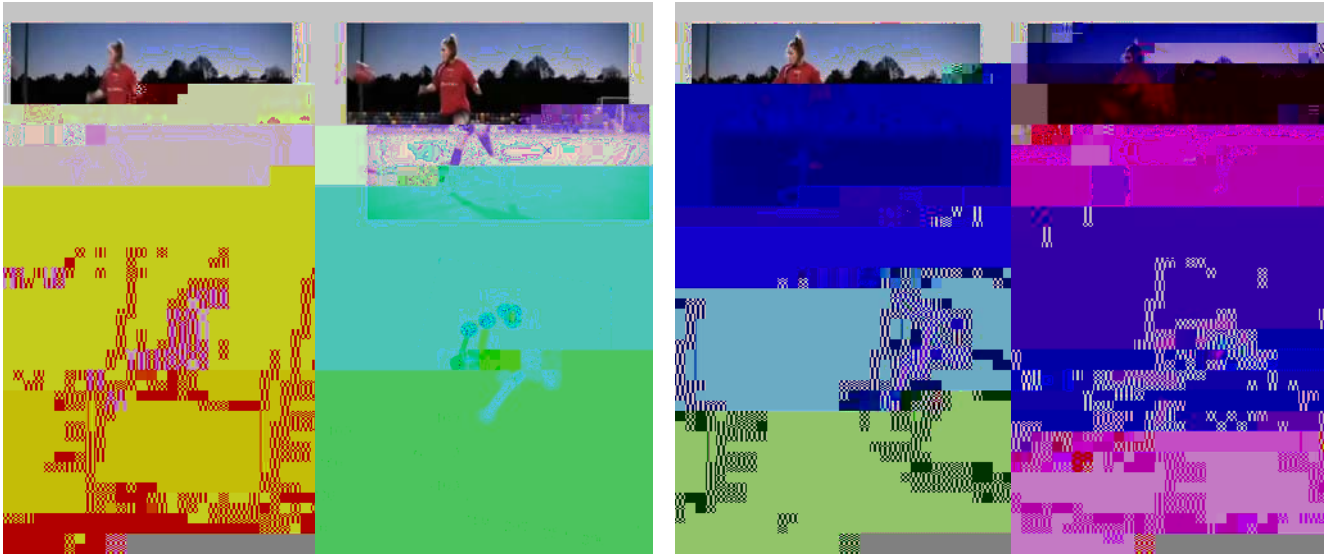
]5/&!20(! 0>!>35 1)! !(!:'4)\$!5!(/03)!A5()-!0\$!)=,5%'0\$!Q8!!9&!0\$;./&5\$:)!(!&5%!&!)!(/03)!
 >30 1 !&!)!23)4'0, (!>35 1)[(!'\$/0 1 '\$: !20(!'(!5--)-!5(!+);;8!!M>%)3!&!)!>'\$5;!>35 1)!'(!3)5/&)-*!
 -)%3 1 '\$\$: !&!)!(=,)\$)/(!0>!20(!'(!' 1 2; . !5! 1 5%)3!0>!A5/@%35/@'\$: !&30, : &!&!)! :352&!(%53%'\$:!
 + '%&!&!)! 1 '\$' 1 , 1! !45;,)!'\$!&!)!>'\$5;!>35 1)8!

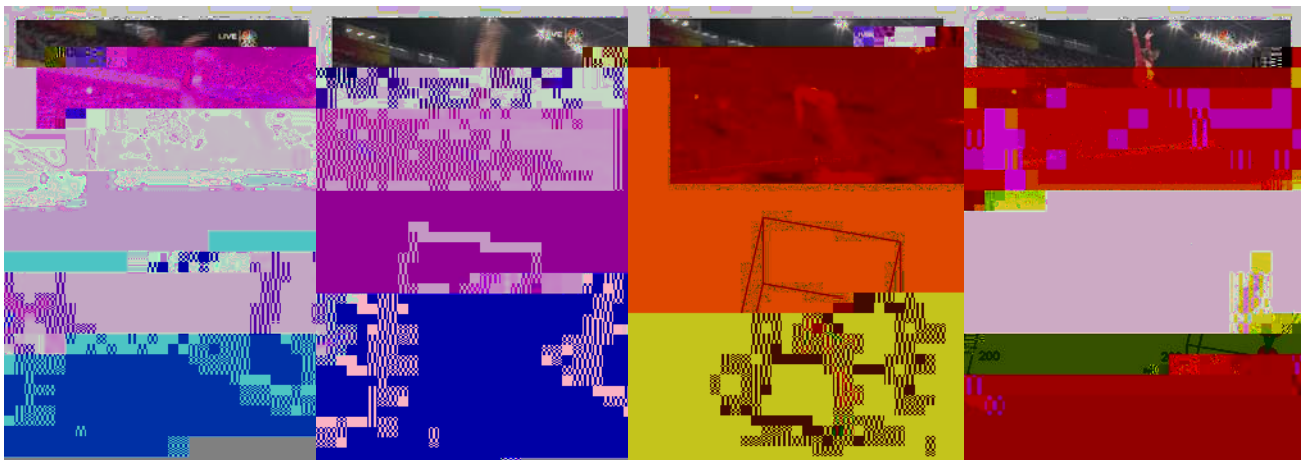
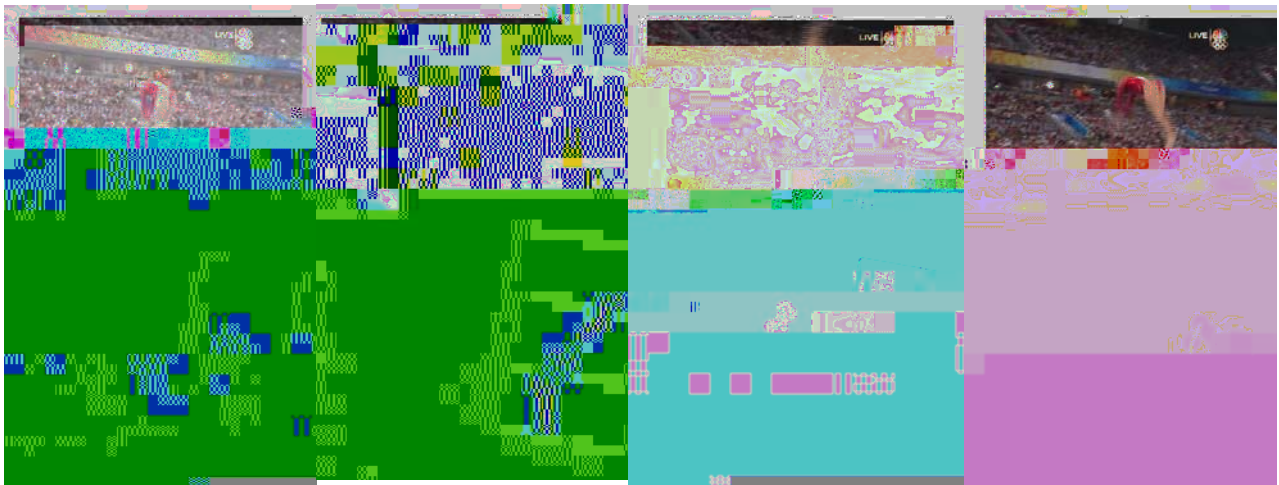
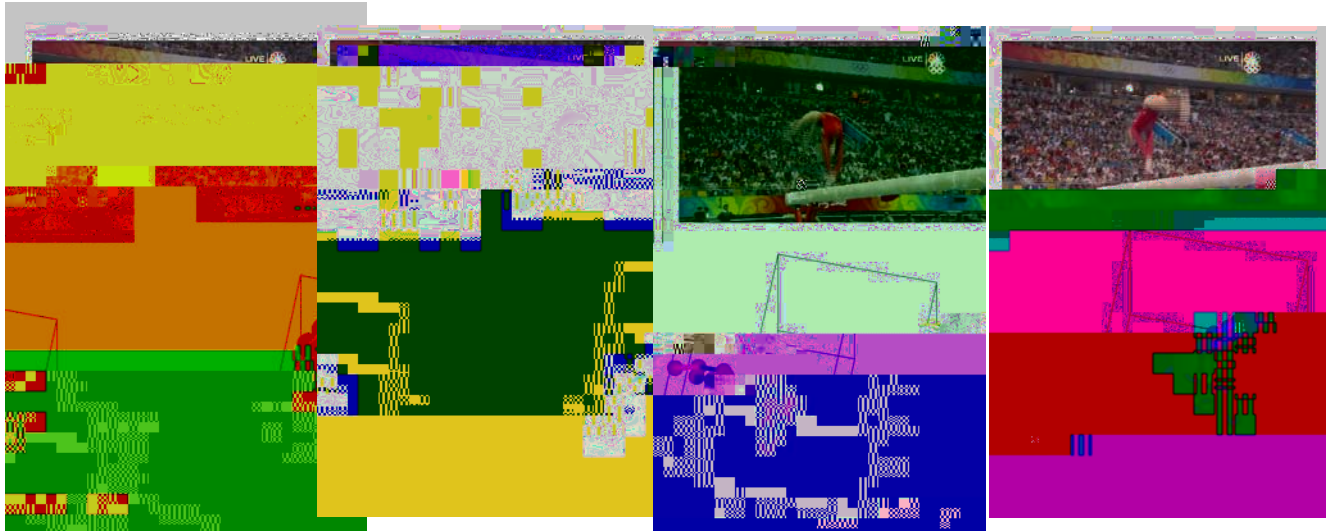
5. Results

Single Frame Reconstruction



Multiple Frame Reconstruction





6. Discussion!

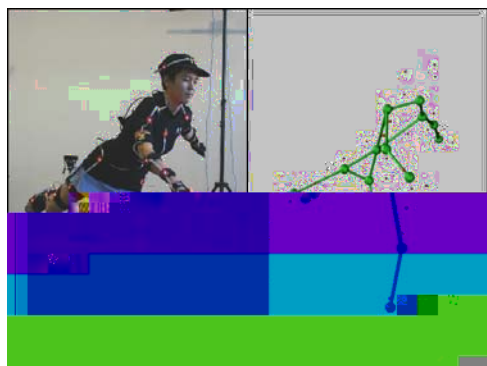
! M(!%&!5A04!)3)(,;%(!&0+*!%&'(!1)%&0-!0>!67!&, 15\$!20(!3)/0\$(%3,/%'0\$!'(!'\$-))-!
 20(('A;)'!\$!A0&!('\$:;)'! 15:)(!5(!+);;!5(!4'-)0!(=,)\$/) (8!!M;%&0, :&!%&'(!.(%) 1!'(!\$0%!GVV j !
 5//,35%)*!%&!)3)(,;%(!53)!:00-!)\$0, :&!%0!A)!A0%&!1)5\$'\$:;>,!5\$-!, ()>, ;8!

6.1 Applications

! 9&'(!%&)'(!)<5 1 '\$) (!%+0!522;'/5%'0\$(!-'3)/%;. !3);5%) -!%0!67!&, 15\$!20(!3)/0\$(%3,/%'0\$8!!
 9&!)>'3(!'(!/&535/%)3!5\$' 15%'0\$!5\$-!%&!)/0\$-!'(!203%(!2)3>03 15\$/!)5\$5; . '(8!!!

! 935- '%'0\$5; . *! /3)5%'\$: ! 104) 1)\$%! -5%5!>03!/&535/%)3!5\$' 15%'0\$!'(!4)3 . !; ' 1 %) -8!!
 #\$\$- '4' - ,5;(!+)53'\$:!(, '%(!+ '%&!%35/@'\$: ! 153@)3(!+)3)!/0\$(%35'\$) -!%0! 104'\$: !+ '%&'\$!(15; ;!53)5(!
 +&)3)!(2)!'5;!/5 1)35(! 10\$%'03!%&)'3!5/%'0\$(8!!^)/5, ()!0>!%&'(*!%35/@5A;)!5/%'0\$(!53)!; ' 1 %) -!'\$!
 15\$. !+5. (8!!9&'(!67!20(!3)/0\$(%3,/%'0\$!0>>)3(!5\$!, \$/0\$(%35'\$) -!>03 1 !0>! 10%'0\$!/52%, 3)!%&5%!
 3)=, '3)(\$0!(2)!'5;!)=, '2 1)\$%8!

!



b5c!



bAc!

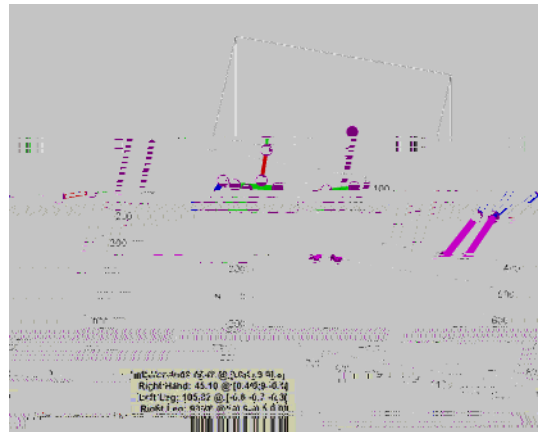
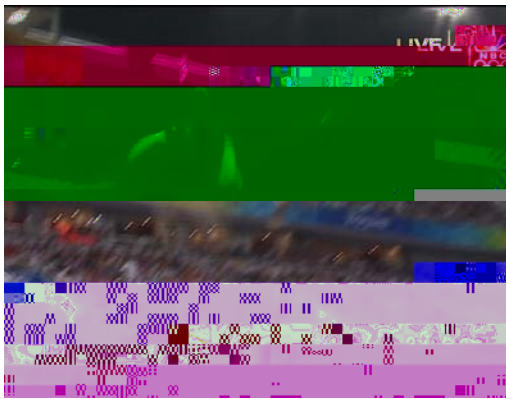


J': ,3)IR8!!b5c!(&0+(!2)3(0\$!+)53'\$: !%35/@5A;)! 153@)3(!+ '%&!%&!)3)(,;% '\$: !/0 1 2, %)3!:) \$)35%) -!20(!)\$<N!%0!'%8!!
 bAc!(&0+(!%&!)(5 1)'! 15:)!+ '%&!, ()3! 153@) - !B0'\$%(8!!9&!)3)(,;% '\$: !67!20(!)'(!&0+\$!%0!%&!)3': &%8!

!

M(!.0, /5\$(!))!\$!>: ,3)!RA*!+ '%&0, %!5\$.!(2) /'5;!/5 1)35(!03!, (!) !0>!%&)!%35/@ '\$: ! 1 53@)3(*!5!(' 1 ';53!
 67!20(!)!(!:)\$)35%) -8!!# \$!)>>)/%*!%&'(! 1)5\$(!%&5!5\$.!4' -)0!/5\$!A)!, (!) -!%0!:)\$)35%)!5!()3')(!0>!67!
 &, 1 5\$!20(!) (8!!9&)!BO'\$%;0/5%'0\$(!0>!%&)!20(!) (!/5\$!%&)\$!(' 1 2; .!A)!2; , : :) -!' \$%0!5\$.!@ '\$ -!0>!
 /&535/%)3!5\$' 1 5%'0\$(!0>%+53)!5\$-!%&)!5/%'0\$(!0>!%&)!03' : '\$5;!4' -)0!/5\$!A)!5/%) -!0, %!A .!5\$.!35\$:)!
 0>!/ &535/%)3(8!

! 9&)(!)/0\$ -!522; /5%'0\$!0>!%&'(!% .2)!0>!(0>%+53)!('!>03!(203%(!2)3>03 1 5\$/)!5\$5; . ('(8!!M!
 /0 1 2, %)3!'(!/525A;)!0>!/0\$4) . '\$: !;53:)!5 1 0, \$(!0>!-5%5!5>%)3!3)/03- '\$: !5\$-! 1 0\$'%03'\$: !5\$!5/%'0\$!
 2)3>03 1) -!A. !5\$!5%& ;%)8!!^ .!(' 1 2; .!%35/@ '\$: !%&)'!\$- '4' - ,5;!20'\$\$(!0>!%&)!20(!)*!%&)(2) -!5\$-!
 -'3)/%'0\$!0>!)5/&'!\$- '4' - ,5;!BO'\$%/5\$!A)!/5;/ ,5%) -8!



J': ,3)!S8!9&)(2) -!5\$-!'3)/%'0\$!0>!5; ;!>0, 3!)<3) 1 %')(!53)!-!(2;5 .) -!%&30, : &!%&'(!: . 1 \$5(%[(!A5;5\$/)!
 A)5 1 !2)3>03 1 5\$/)8!

]4)\$!+ '%&'(!, /&!5!(' 1 2;)!(%) , 2*!%&!4);0/ '% .!0>!453'0, (!A0- .!253%(! /5\$!A)!5\$5; .F) -*! 1 , ;%'2;)!
 >35 1)(!/5\$!A)!, (!) -!%0!/5; / , ;5%)!%&)'3!3)(2)/%'4)!5//);)35%'0\$(*!5\$-!04)35; ;!>>'/')\$/ .! /5\$!A)!
 & .20%&)('F) -8!!# \$!5-- '%0\$!%0!5; ;!0>!%&'(*!A.!(' 1 2; .!' \$/; , - '\$: !5-- '%0\$5; !'\$>03 1 5%'0\$!+ '%&!%&)!20(!)*!
 0%&)3!5(2)/%(!0>!%&)!5/%'0\$! /5\$!A)!<5 1 '\$) -8!!] (% ' 1 5%' \$: !%&!) +)': &%!0>!%&)'!\$- '4' - ,5;/0, ; -! .'); -!
 '\$>03 1 5%'0\$!(, /&!5(!%&)!5 1 0, \$(!0>!+03@!-0\$)!A. !- '>>)3)\$%!' 1 A(!03!%03=,)!)<2)3')\$ /) -!A. !
 -'>>)3)\$%!BO'\$%(8!

6.2 Related Work

? '%&'\$!%&)(/02)!0>!%&'(!%&)'(*!%&)3)!&5(!3/)\$%;. !A)\$!(0 1)!+03@!-0\$)!A. !0%&)3!
 '\$- '4' - ,5;(*!%&)! 1 0(%!\$0%5A;)!0>!+&' /&'(!X'\$<'5\$: !C&5'8!!N30>)((03!C&5'!!/ ,33)\$%;. !%)5/ &)'(\$!%&)!
 7)253% 1)\$%0>!C0 1 2, %)3!I /')\$ /)!5\$- !] \$: '\$))3'\$: !5%19)<5(!Mk D!E\$'4)3(% . 8!!W'(!+03@!'\$/; , -)(!
 :)\$)35%'\$: !& , 1 5\$!20()(!>30 1 !(%';;!' 1 5 :)(!YUZ!5(!+);; !5(!4' -)0!()=,)\$ /)(!YGVZ8!!9&)! 1)%&0-(!, ()-!
 53)!4)3. !(' 1 ' ;53!A, %! - '>>)3!'!\$!5!>)+!@) . !20'\$%(8!!N30>)((03!C&5'[(! 1)%&0-!(%';;!3)=, '3)(!5!, ()3!0!
 1 53@!@) . !20'\$%(!+'%&'\$!5\$!' 1 5 :) *!&0+)4)3!GT!20'\$%(!0>'!\$%)3)(%!53)!\$ /)((53. 8!!M(!5!3)(, ;%*!%&)!
 & , 1 5\$!20()!'(!->'\$)-!A. !GS!;'\$)!() : 1)\$%(8!!9&'(!. (%) 1 ! 1 5 @)(!\$0!5((, 1 2%'0\$(!5A0 , %!%&)!
 ;)\$: %&(!0>!%&)!'(\$)!() : 1)\$%(*!A, %!5(!5!35-)0>>*!>'4)! ' 1 5 :)(!53)!\$))-)-!0>!5!'(\$: ;)!20()!'!\$!03-)3!0!
 3) 1 04)!5\$. !5 1 A': , % . 8!!!

#\$!5-- '%0\$!%0!%&)!5A04)!2, A; '/5%'0\$(*!N30>)((03!C&5'!&5(!5!2, A; '/5%'0\$!-)(/3'A'\$: !5!
 (. (%) 1 !%&5%!:)\$)35%)(!& , 1 5\$!20()(!A5() -!0\$!5!/0; ; /%'0\$!0>! 1 ' ; ;'0\$(!0>)<5 1 2;)!20()(!YGGZ8!!9&'(!
 522305 /&'(!4)3. !(' 1 ' ;53!%0!%&)!L5, (('\$5! 1 ' < , 3)! 1 0 -); !23'03! , () -!'!\$!%&'(!230B) /%8!

6.3 Future work

9&)3)!53)!%+0! 1 5B03!20%)\$'5;53)5(!0>'! 1 2304) 1)\$%>03!%&'(!230B) /%8!!9&)!>'3(%!'(!%0!&54)!
 (0 1)!+5. !0>!5, %0 1 5%' /5; ; . !%35/ @ '\$: !" 7!B0'\$!20('%'0\$(8!!9&'(!+5(!5!230A;) 1 !>03!%+0!3)5(0\$(8!!
 J'3(%!0>!5; ; *! 1 5\$. !0>!%&)!4' -)0(!, () -!+)3)!\$0%!4)3. !&' : &! = , 5; % . 8!!93. '\$: !%0!>'\$-!@) . !20'\$%(!'!\$!
 1 0%'0\$!A; , 33) -!' 1 5 :)!'(!5! - '>>' / , ;% !5(@!>03!5!2)3(0\$*!;)%5;0\$)!5!/0 1 2, %)38!!9&)!67!
 3) /0\$(%3, /%'0\$!'(!4)3. ! 1 , /&! -)2)\$-5\$%!0\$!%&)!5// , 35/ . !0>!%&)!B0'\$%!;0/5%'0\$(8!!M(' \$: ;)!0, %;)3!
 +0, ; -!5; 1 0(%! /)3%5'\$; . ! /&5\$:)!5!20()!%3) 1)\$-0, (; . 8!!9&)!() /0\$-!230A;) 1 !'(!0// ; , ('0\$8!!9&'(!/5\$!
)'&)3!A)!%&)!3)(, ; %!0>!5\$!0AB) /%!522)53'\$: !A)%+)\$!%&)! /5 1)35!5\$- !%&)!2)3(0\$!A)'\$: !3) /03-) - *!03!
 %&)!2)3(0\$!% , 3\$'\$: !'\$!(, /&!5!+5. !%&5%!%&) . !53)!0\$; .

\$0%35/@)-*!%&)\$!5!67!3)/0\$(%3,/%'0\$!+0,;-!A)/0 1)! 1)5\$'\$:;)((!A)/5,(!%&)!&, 1 5\$!A0- .!+0,;-!
\$0%A)!/0 1 2;)%!)!+&)\$!\$(2)/%) -!>30 1!- '>>3)\$%5\$;:;)(8!

9&)!\$)<%! 1 5B03! 1 2304) 1)\$%!!%5%!(%&0,;-!A)! 1 5-)!(!0 1)!>03 1 !0>!/0;;('0\$!-)%) /%'0\$8!!
9&'(!/0;;('0\$!-)%) /%'0\$!/5\$!3)>)3!%0!)'%&3!%&!A0- .!5(!'%!3);5%)(!%0!%0, /&'\$:!'%());>!03!0%&3!0AB)/%(!
'\$!'(!' 1 1)-'5%)!)\$4'30\$ 1)\$%8!!M('!(%5\$-(*!%&!)/0;;)/%'0\$!0>20'\$%(!'\$!5!:))\$35%)-!67!&, 1 5\$!
20(!@0+!%;%);)!;(!%&5\$!&0+!%0!/0\$\$)/%!'\$!03-)3!%0!>03 1 !5!(%'/@!>: ,3)8!!^)/5, (!0>!%&'(*!20(!
%&5%!!&54)!;): (!03!53 1 !/30((-!(0 1)%' 1)(!&54)!0\$)!;' 1 A!25(('\$: !%&30, :&!5\$0%&)38!!N30A;) 1 (!;'@)!
%&'(!/0,;-!A)!540'-)-!A .!5-- '\$: !%&!)/0\$(%35'\$%!!%5%!!+0!;' 1 A(!/5\$\$0%!(' 1 ,;%5\$)0,(; .!0// ,2 .!
(0 1)!53)5!'\$(25/)8!

H4)35;;*!%&'(!0>%+53)!3)23())\$%(!5!: 00-!(%53 '\$: !20'\$%!>03!&, 1 5\$!20(!3)/0\$(%3,/%'0\$8!!#\$!
5-- '%0\$!%0!%&!20('A;)!522;' /5%'0\$(!-)(/3'A)-!5A04)*!0%&)3!>,%,3)!- '3)/%'0\$(!>03!%&'(!230B)/%!
'\$/;,-)!2)3>03 1 5\$/)!5\$5;. ('(*!35/@ '\$: ! 1 ,;%d2)3(0\$!'\$%)35/%'0\$*!03!)>>'/'!)\$%; .!/3)5%'\$: !/0 1 2,%)3!
(' 1 ,;5%'0\$(!'\$40;4'\$: !2)02;)8!

!

""

7. Acknowledgements

Professor Jiang

! g0,3!:, '-5\$/)!\$!/0 1 2;)%'\$: !%&'(!230B)/%!+5(!'\$45;, 5A;)8!!9&)3)!+3)! 1 5\$. !%' 1)(!+&)\$!
 %&)%5(@!5%&5\$-!()) 1)-!%00!04)3+&); 1 '\$: *!.)%! .0, !5;+5. (!&5- !%' 1)!%0!(%'!-0+\$!+ '%&! 1)!5\$-!()%)!
 1)! '\$!%&!)3': &%!- '3)/%'0\$8!!9&'(!230B)/%!+0, ;-!\$0%&54)!\$)53;.. !522305/&)- !%&)!(/02)!%&5%!'!-'-!
 &5-!'!\$0%A))\$!>03!. 0, 3!/0\$%'\$,)-!(, 2203%8!

!

Professor Yu

#!3): 53-!+03@\$:'\$!. 0, 3!3)()53/&!;5A!5(!A)'\$: !0\$)!0>!%&! 1 0(%!A)\$>/'!5;!5\$-!'\$>;,)\$%'5;!
)<2)3')\$)/(!0>! 1 .!;/0;;:)!/53))38!!9&5\$@!. 0, !>03!%5@\$:'! 1)!, \$-)3!. 0, 3!+ '\$: !5\$-!%)5/&'\$:'! 1)!%&)!
 3': 03(!0>!5/5-) 1 '/!3)()53/&8!!

Professor Martin

g0,3!/0 1 2, %5%'0\$!2&0%0: 352&.!;/;5((!+5(!A. !>53!%&! 1 0(%!- '>>'/, ;%!/;5((!#&54)!%5@)\$!5%!
 ^0(%0\$!C0;;:)8!!9&5%!A)'\$: !(5'-*!#!+0, ;-!\$0%A)!&)3)!5(!5!/0 1 2, %)3!(/'\$)/! 1 5B03!\$03!'\$40;4)-!
 + '%&!/0 1 2, %)3!4'('0\$!&5-!. 0, 3!%)5/&'\$: !\$0%! 1 5-)! 1)!>5;;!'\$;!04)!+ '%&!A0%&!(!, AB)/%(8!

!

8. References

!!!YGZ! M& 1 5- *!D8!5\$- !O)) *!I8!!WD DdA5()- !W, 1 5\$!M/%'0\$!K)/0: \$%'0\$!E('\$: !D, ;%'4') +!
 # 1 5:)!I)=,)\$ /)8!!# \$!N30/)) - '\$: (!0>!%&!GT%&!# \$%)3\$5%'0\$5;!C0\$>)3)\$ /)!0\$!N5%%)3\$!
 K)/0: \$%'0\$!"VVR8!

Y"Z! ^35\$- *!D8*!H;'4)3*! 1 8*!N)\$%;5\$- *!M8!!CO, 2;)- !W' - -)\$!D53@04!D0-);(!>03!CO 1 2;)<!
 M/%'0\$!K)/0: \$%'0\$8!!# \$!N30/)) - '\$: (!0>!#]]]!C0\$>)3)\$ /)!0\$!CO 1 2, %)3!m'('0\$!5\$-!
 N5%%)3\$!K)/0: \$%'0\$!GUUR8!

Y6Z!! ^0A' /@*!M8!J8!5\$- !#45\$04*!g8!M8!!M/%'0\$!K)/0: \$%'0\$!, ('\$: !N30A5A';'(%' /!N53('\$: 8!!# \$!
 N30/)) - '\$: (!0>!#]]]!# \$%)3\$5%'0\$5;!C0\$>)3)\$ /)!0\$!CO 1 2, %)3!m'('0\$!5\$- !N5%%)3\$!
 K)/0: \$%'0\$!GUUT8

YPZ! C&)\$*!g8!5\$- !C&5*!X8!!67!K)/0\$(%3, /%'0\$!0>!W, 1 5\$!D0%'0\$!5\$- !I@);)%0\$!>30 1!
 E\$/5;'A35%) - !D0\$0/ , ;53!m' -)08!!# \$!N30/)) - '\$: (!0>!#]]]!M('5\$!C0\$>)3)\$ /)!0>CO 1 2, %)3!
 m'('0\$!"VVU8!

YQZ! 7 ' 1 '%3'B)4' / *!D8*!O)2)%%'!m8*!J, 5*!N8!!W, 1 5\$!^0- . !N0(!K)/0: \$%'0\$!E('\$: !I25%'Od
 9) 1 2035;!9) 1 2;5%)(8!!# \$! ? 03@(&02!0\$!D0-); '\$: !N)02;)!5\$- !W, 1 5\$!# \$%)35/%'0\$!^)'B'\$: *!
 C&'\$5*!H/%!GQ\ "G*"!VVQ8!

!

"P

!YUZ! ?)'!* f 8!5\$-!C&5!*X8!!D0-);'\$: !67!W, 1 5\$!N0()(!>30 1 !E\$/5;'A35%)-!D0\$0/ , ;53!# 1 5:)(!!
\$!N30/)) - '\$: (!0>!#]]] !# \$%)3\$5%'0\$5;!C0\$>)3)\$/)!0\$!C0 1 2, %)3!m'('0\$!'VVU8!

YGVZ! ?)'!* f 8!5\$-!C&5!*X8!!m' -)0D0/52e!D0-);'\$: !N& . ('/5;; . !K)5;'(%'!/W, 1 5\$!D0%'0\$!>30 1 !
D0\$0/ , ;53!m' -)0!I)=,)\$/)8!!90!M22)53!'!MCD!935\$(5/'0\$(!0\$!L352&'/'(!"VGV8!

YGGZ! ?)'!* f 8!5\$-!C&5!*X8!!# \$%, '%4)!# \$%)35/'4)!W, 1 5\$!C&535/%)3!N0('\$: !+ '%&!D';;'0\$(!0>!
] <5 1 2;)!N0()(!>90!M22)53!'!#]]] !C0 1 2, %)3!L352&' / (!5\$-!M22; '/5%'0\$(!"VVU8!

YG"Z!! g 5 1 5%0!*X8!*H& .5!*X8!#(&'!*!n8!!K)/0: '\$'F'\$: !W, 1 5\$!M/'0\$!'!\$9' 1)dI)=,)\$%'5;!# 1 5:)(!
, ('\$: !W'--)\$!D53@04!D0-);8!!# \$!N30/)) - '\$: (!0>!#]]] !C0\$>)3)\$/)!0\$!C0 1 2, %)3!m'('0\$!
5\$-!N5%%)3\$!K)/0: '\$%'0\$!228!6SU\6TQ!*GUU"8!

YG6Z! g'; 1 5F!*M8!5\$-!I&5&!*D8!!M/'0\$(!I@)%/&e!M! 1 04);!M/'0\$!K)23)()\$%5%'0\$8!!# \$!
N30/)) - '\$: (!0>!#]]] !C0 1 2, %)3!I0/') . !C0\$>)3)\$/)!0\$!C0 1 2, %)3!m'('0\$!5\$-!N5%%)3\$!
K)/0: '\$%'0\$!'VVQ8!

!

9. Other Resources

!

YGPZ!!! ^ '0 1 0%'0\$!O5A8!&%2e00+ + +8A'0 1 0%'0\$;5A8/5o!!

YGQZ!!CDE!L352&' / (!O5A!D0%'0\$!C52%, 3)!7 5%5A5(*)! 1 0/528/(8/ 1 ,8) - , *! -)4);02) - !+ '%&!

>, \$- '\$: !>30 1 ! 1 I J!] #MdvGUR"GS!